

A GEOLOGIA DA FRENTE DE TÚNEIS E SUAS IMPLICAÇÕES NAS INCERTEZAS DO CÁLCULO DO SISTEMA Q - BARTON

JOÃO ANDRÉ FALCÃO DE SOUSA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Professor Doutor António Barbot Campos e Matos

Dr. Benedito Calejo Rodrigues

Julho de 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais e avós

“The whole purpose of education is to turn mirrors into windows.”

Sydney J. Harris

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Doutor António Manuel Barbot Campo e Matos, por toda a atenção e orientação que me deu no decorrer deste trabalho, assim como toda a disponibilidade com que me recebeu.

Ao Dr. Benedito Calejo Rodrigues cujo apoio, disponibilidade e motivação foram fundamentais na realização desta dissertação.

Ao André Novo cuja ajuda e pareceres em questões técnicas foram essenciais.

Aos meus três grandes amigos e colegas de curso por facilitarem todo o meu percurso académico com boa disposição e alegria, mas mais importante por me ajudarem a crescer como pessoa.

- Alexandre Polícia
- André Teixeira
- João Primavera

E ainda à Daniela Almeida e ao Márcio Filipe por todo apoio, compreensão e motivação que sempre me deram.

Por último, aos meus pais, irmãos e avós que sempre me acompanharam com toda a paciência e dedicação.

RESUMO

Com este trabalho pretende-se analisar e quantificar os erros, dúvidas e incertezas associadas à aplicação dos parâmetros do sistema de Q - Barton, assim como a influência dos factores intrínsecos ao observador na sua avaliação em frente de obra subterrânea.

Fez-se uma descrição das classificações geomecânicas para maciços rochosos que são mais utilizadas atualmente no pré-dimensionamento de estruturas subterrâneas, com foco na classificação baseada no Sistema Q - Barton e na caracterização de seus parâmetros.

Para o estudo da aplicação do índice Q do sistema de Barton, é utilizada uma amostragem relativa aos dados de seis túneis de adução concretos de um circuito hidráulico de uma obra existente, ainda em fase de construção. Desta forma, os registos dos valores estimados e adotados em obra foram comparados com os valores calculados e quantificados de forma objetiva no âmbito do presente trabalho. Esses elementos foram cedidos para a realização deste estudo.

É efectuado um estudo e tratamento estatístico dos parâmetros em que se baseia o sistema de Q - Barton, do índice de qualidade Q e das respectivas classes de qualidade do maciço rochoso, analisando as diferenças encontradas na avaliação da mesma amostragem pelos técnicos em obra.

Com esta análise e comparação, avalia-se a confiança e a influência que o método o sistema de classificação de Q - Barton teve no desenvolvimento da obra. Assim como as consequências em custos de tratamento geotécnico e dias de trabalho, associadas a uma estrutura cujas características globais fossem representados pela amostragem utilizada.

Os resultados obtidos são interessantes e alertam para a necessidade de se aprofundar as questões abordadas.

PALAVRAS-CHAVE: Q - Barton, túnel, subterrânea, maciço rochoso, escavação, parâmetros, NATM

ABSTRACT

The main goal of this work is to analyse and quantify errors, doubts and uncertainties regarding to the use of the Q – Barton system parameters, as well as the influence of related factors to the observer in its assessment on the field, in a underground work.

It has been done a description of geomechanical classification for rock masses that are most used in the preliminary design of underground structures, focusing on the Q-System and the characterization of his parameters.

Regarding the study of the application of Q index of Q - Barton system, a six adduction tunnels of hydraulic circuit sampling data, belonging to a hydroelectric power plant still under construction, was used. Thus, records of estimated and adopted values were compared with calculated and quantified values, in an objectively way, for this work. Those elements were given to this study.

Based on the data available has been done a study and a statistical analysis treatment of the Q- Barton system parameters, Q quality index and the respective classes of the rock mass quality, in order to study the differences on the evaluation of the same sampling by technicians on site.

With this analysis and comparison, we can evaluate the confidence and the influence that the Q-system method had in the tunnels development. As well as the consequences in geotechnical treatment costs and work days associated to a structure whose overall characteristics were represented by the used sample.

The final results are interesting and warns the need to get further on the questions deepen the issues discussed.

Key-Words- Q-system, Tunnel, Underground, Rock mass, Excavation, Parameters, NATM

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v

1.INTRODUÇÃO 1

2.CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS 3

2.1. INTRODUÇÃO 3

2.2. CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS 4

2.2.1. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE BIELEWSKY – RMR(“ROCK MASS RATING”) 4

2.2.2. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE HOEK E BROWN – GSI (“GEOLOGICAL STRENGTH INDEX”)..... 9

2.2.2.1. Critério de ruptura de Hoek-Brown.....9

2.2.2.2. Classificação GSI10

2.3. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE BARTON – Q (“QUALITY INDEX”)13

2.3.1. BREVE REFERÊNCIA À HISTÓRIA DA CLASSIFICAÇÃO DE BARTON13

2.3.2. ÁREAS DE APLICAÇÃO15

2.3.3. PARÂMETROS E SUA DESCRIÇÃO16

2.3.3.1. Parâmetro RQD.....16

2.3.3.2. Parâmetro J_n19

2.3.3.3. Parâmetro J_r20

2.3.3.4. Parâmetro J_a21

2.3.3.5. Parâmetro J_w23

2.3.3.6. Parâmetro SRF.....24

2.3.4. CÁLCULO DO ÍNDICE Q.....26

2.3.4.1. Parâmetros geotécnicos relacionados com o índice Q - Barton27

3. DESCRIÇÃO GERAL DO CIRCUITO HIDRÁULICO31

3.1. INTRODUÇÃO31

3.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DO CIRCUITO HIDRÁULICO.32

3.2.1. GEOLOGIA LOCAL32

3.2.2. CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO	32
3.2.2.1. Caracterização do Maciço rochoso do Túnel de adução 1	33
3.2.2.2. Caracterização do Maciço rochoso do Túnel de adução 2	34
3.2.2.3. Caracterização do Maciço rochoso do Túnel de adução 3	35
3.2.2.4. Caracterização do Maciço rochoso do Túnel de adução 4	36
3.2.2.5. Caracterização do Maciço rochoso do Túnel de adução 5	37
3.2.2.6. Caracterização do Maciço rochoso do Túnel de adução 6	38
3.2.2.7. Análise Comparativa dos seis Túneis de adução.....	39
3.2.3. DESCONTINUIDADES INTERPRETADAS COMO FALHA	40
3.2.3.1. Descontinuidades interpretadas como zonas de falha no Túnel de adução 1.....	41
3.2.3.2. Descontinuidades interpretadas como zonas de falha no Túnel de adução 2.....	42
3.2.3.3. Descontinuidades interpretadas como zonas de falha no Túnel de adução 3.....	43
3.2.3.4. Descontinuidades interpretadas como zonas de falha no Túnel de adução 4.....	44
3.2.3.5. Descontinuidades interpretadas como zonas de falha no Túnel de adução 5.....	45
3.2.3.6. Descontinuidades interpretadas como zonas de falha no Túnel de adução 6.....	45
3.3. FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES DE PROJETO	46
3.4. TRATAMENTOS GEOTÉCNICOS.....	49

4.OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO Q- BARTON

4.1. INTRODUÇÃO	55
4.2. AMOSTRAGEM DO ESTUDO.....	55
4.3. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DE Q - BARTON	60
4.3.1. OBTENÇÃO DO PARÂMETRO RQD	60
4.3.2. OBTENÇÃO DO PARÂMETRO J_n	62
4.3.3. OBTENÇÃO DO PARÂMETRO J_r	71
4.3.4. OBTENÇÃO DO PARÂMETRO J_a	74
4.4. SÍNTESE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS	78

5. COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS VALORES DE Q - Barton

5.1. INTRODUÇÃO	81
5.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS CASOS DE ESTUDO	81

5.3. ANÁLISE GLOBAL DOS VALORES DE Q - BARTON	109
5.4. QUANTIFICAÇÃO DOS ERROS E INCERTEZAS DA PARAMETRIZAÇÃO DO Q - BARTON	113
5.4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AVANÇOS EM ESCAVAÇÃO SUBTERRÂNEA EM TÚNEL	113
5.4.2. CARACTERIZAÇÃO DO CUSTO DOS TRATAMENTOS GEOTÉCNICOS.....	116
5.4.3. ANÁLISE DO TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO DOS TRATAMENTOS GEOTÉCNICOS	119
5.5. CONCLUSÕES	121
 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	123
6.1. CONCLUSÕES DO TRABALHO REALIZADO	123
6.2. SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	124
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
 ANEXOS	128
ANEXO A - GEOLOGIA E GEOTÉCNIA (TÚNEIS DE ADUÇÃO)	130
ANEXO B – TABELAS DE CAMPO	135
ANEXO C – PROJEÇÕES ESTEREOGRÁFICAS DAS DESCONTINUIDADES	141
ANEXO D – DADOS ESTATÍSTICOS	167

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Representação gráfica da obtenção do valor de RMR	5
Fig. 2.2 - Estimativa do valor GSI com base na descrição geológica (Marinos & Hoek, 2000)	11
Fig. 2.3 - Estimativa do valor GSI para maciços rochosos heterogêneos como o flysh (Marino & Hoek, 2000)	12
Fig. 2.4 - Gráfico de recomendação de suporte para o sistema de classificação Q - Barton (Barton et al. 1974).....	13
Fig. 2.5 - Classes de suporte estimadas para o sistema de classificação Q - Barton (Grimstad e Barton, 1993).....	14
Fig. 2.6 - Classes de suporte estimadas para o sistema de classificação Q - Barton integrando a absorção de energia e os RRS (Grimstad et al. 2002)	15
Fig. 2.7 - Exemplo de cálculo do índice volumétrico J_v (apontamentos de geologia da engenharia, FEUP).....	17
Fig. 2.8 - Relação entre o RQD e o número médio de descontinuidades por metro, λ (Priest & Hudson, 1976).	18
Fig. 2.9 - Exemplos de paredes de descontinuidades com diferentes rugosidades e valores de J_r	20
Fig. 2.10 - Exemplo de cálculo do índice Q – Barton.....	25
Fig. 2.11 - Qualificação do maciço rochoso com base no índice Q – Barton	25
Fig. 2.12 - Limites das classes geomecânicas utilizados no projeto dos túneis de adução em estudo	27
Fig. 3.1 - À esquerda, amostra de gnaiss anfibolítico evidenciando o bandado gnáissico típico, com bandas mais feldspáticas, de cor mais claras, com dobramentos e leitos anfibolíticos, mais escuros, exibindo boudinagem; transversalmente a esta estruturação são visíveis pequenos veios esverdeados, mais tardios, com o epidoto associado ao retrometamorfismo. À direita, frente de escavação num dos túneis de adução, observando-se no lado esquerdo uma zona mais oxidada correspondente a uma zona de falha a desenvolver-se perpendicularmente ao eixo do túnel	33
Fig. 3.2 - Síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração, consistência/coerência e fracturação do maciço rochoso do TA01	34
Fig. 3.3 - Síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração, consistência/coerência e fracturação do maciço rochoso do TA02	35
Fig. 3.4 - Síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração, consistência/coerência e fracturação do maciço rochoso do TA03	36
Fig. 3.5 - Síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração, consistência/coerência e fracturação do maciço rochoso do TA04	37
Fig. 3.6 - Síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração, consistência/coerência e fracturação do maciço rochoso do TA05	38
Fig. 3.7 - Síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração, consistência/coerência e fracturação do maciço rochoso do TA06	39
Fig. 3.8 - Síntese comparativa das características de alteração, consistência e fracturação dos seis túneis de adução.	39

Fig. 3.9 - Análise estatística das características das zonas de falha do TA01 quanto à regularidade, rugosidade, tipo de contacto, abertura e alteração	41
Fig. 3.10 - Análise estatística das características das zonas de falha do TA02 quanto à regularidade, rugosidade, tipo de contacto, abertura e alteração	42
Fig. 3.11 - Análise estatística das características das zonas de falha do TA03 quanto à regularidade, rugosidade, tipo de contacto, abertura e alteração	43
Fig. 3.12 - Análise estatística das características das zonas de falha do TA04 quanto à regularidade, rugosidade, tipo de contacto, abertura e alteração	44
Fig. 3.13 - Análise estatística das características das zonas de falha do TA05 quanto à regularidade, rugosidade, tipo de contacto, abertura e alteração	45
Fig. 3.14 - Análise estatística das características das zonas de falha do TA06 quanto à regularidade, rugosidade, tipo de contacto, abertura e alteração	46
Fig. 3.15 - Famílias de Projeto (túnel 3 entre as progressivas pk1+825 e pk1+891).....	47
Fig. 3.16 - Famílias de descontinuidades definidas em trechos de 200 metros de túnel para o túnel de adução 3	48
Fig. 3.17 - Dimensões dos túneis de adução	50
Fig. 3.18 - Tratamento geotécnico aplicado nos maciços de classe I ($Q > 20$)	51
Fig. 3.19 - Tratamento geotécnico aplicado nos maciços de classe II ($3,0 < Q < 20$)	52
Fig. 3.20 - Tratamento geotécnico aplicado nos maciços de classe III ($0,3 < Q < 3,0$)	52
Fig. 3.21 - Tratamento geotécnico aplicado nos maciços de classe IV ($0,01 < Q < 0,3$).....	53
Fig. 3.22 - Tratamento geotécnico aplicado nos maciços de classe V ($Q < 0,01$)	53
Fig. 3.23 - Ábaco do sistema de classificação de Barton com estimativa de suportes necessários para os túneis de adução com diâmetro equivalente de 10,10 para as 5 classes de maciço (Barton,2002) [25].....	54
Fig. 4.1 - Exemplo dos 5 metros de segmento utilizado na caracterização da secção de estudo de avanço 0+871,70 a 0+875,60 pertencente ao TA01, frente B	57
Fig. 4.2 - Exemplo dos dois segmentos de 5 metros utilizado na caracterização da secção de estudo de avanço 0+342,00 a 0+348,00 pertencente ao TA02, frente C	58
Fig. 4.3 - Exemplo dos 10 metros de segmento utilizado na caracterização da secção de estudo de avanço 0+871,70 a 0+875,60 pertencente ao TA01, frente B	58
Fig. 4.4 - Exemplo dos 10 metros de segmento utilizado na caracterização da secção de estudo de avanço 1+285,50 a 1+288,30 pertencente ao TA01, frente B	58
Fig. 4.5 - Histograma com os valores de RQD determinados em obra e calculados por três métodos alternativos	62
Fig. 4.6 - Exemplo de definição de famílias de descontinuidades segundo o critério 1 (TA01B avanço 0+871,70 a 0+875,60) - definição de 2 famílias + aleatórias	65

Fig. 4.7 - Exemplo de definição de famílias de descontinuidades segundo o critério 2 (TA01B avanço 0+871,70 a 0+875,60)) - definição de 2 famílias + aleatórias	66
Fig. 4.8 - Exemplo de definição de famílias de descontinuidades segundo o critério 3 (TA01B avanço 0+871,70 a 0+875,60)) - 1 família + aleatórias	67
Fig. 4.9 - Exemplo de definição de famílias de descontinuidades segundo o critério 4 (TA01B avanço 0+871,70 a 0+875,60) - 3 famílias + aleatórias	68
Fig. 4.10 - Histograma com os valores de J_n determinados em obra e calculados por quatro critérios alternativos	71
Fig. 4.11 - Histograma com os valores de J_r determinados em obra e calculados por três critérios alternativos	74
Fig. 4.12 - Histograma com os valores de J_a determinados em obra e calculados por três critérios alternativos	78
Fig. 4.13 -Histograma com os valores de Q- Barton determinados em obra e calculados por combinação de todos os critérios de determinação de RQD, J_n , J_r e J_a em gabinete	80
Fig. 5.1 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+871.70 a 0+875.60 pertencente ao túnel de adução 1 frente B	82
Fig. 5.2 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+961.90 a 0+966.10 pertencente ao túnel de adução 1 frente B	83
Fig. 5.3 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+285.50 a 1+288.30 pertencente ao túnel de adução 1 frente B	83
Fig. 5.4 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+370.70 a 1+373.80 pertencente ao túnel de adução 1 frente B	84
Fig. 5.5 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+384.80 a 1+388.50 pertencente ao túnel de adução 1 frente B	84
Fig. 5.6 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+825.00 a 0+831.00 pertencente ao túnel de adução 1 frente C	85
Fig. 5.7 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+006.80 a 1+010.90 pertencente ao túnel de adução 2 frente B	85
Fig. 5.8 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+329.40 a 1+331.50 pertencente ao túnel de adução 2 frente B	86

Fig. 5.9 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+412.70 a 1+416.60 pertencente ao túnel de adução 2 frente B	86
Fig. 5.10 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+342.00 a 0+348.00 (A) pertencente ao túnel de adução 2 frente C	87
Fig. 5.11 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+342.00 a 0+348.00 (B) pertencente ao túnel de adução 2 frente C	87
Fig. 5.12 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+501.50 a 0+506.00 pertencente ao túnel de adução 2 frente C	88
Fig. 5.13 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+881.50 a 0+885.50 pertencente ao túnel de adução 2 frente C	88
Fig. 5.14 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+361.70 a 1+365.90 pertencente ao túnel de adução 3 frente B	89
Fig. 5.15 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+406.10 a 1+410.50 pertencente ao túnel de adução 3 frente B	89
Fig. 5.16 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+117.80 a 1+121.10 pertencente ao túnel de adução 3 frente B	90
Fig. 5.17 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+692.00 a 0+698.00 (A) pertencente ao túnel de adução 3 frente C	90
Fig. 5.18 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+692.00 a 0+698.00 (B) pertencente ao túnel de adução 3 frente C	91
Fig. 5.19 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+804.00 a 0+810.00 pertencente ao túnel de adução 3 frente C	91
Fig. 5.20 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+904.50 a 0+910.50 pertencente ao túnel de adução 1 frente B	92
Fig. 5.21 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+005.60 a 1+008.90 pertencente ao túnel de adução 4 frente B	92
Fig. 5.22 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+030.70 a 1+034.80 pertencente ao túnel de adução 4 frente B	93

Fig. 5.23 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+113.30 a 1+117.40 pertencente ao túnel de adução 4 frente B	93
Fig. 5.24 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+201.30 a 1+205.40 pertencente ao túnel de adução 4 frente B	94
Fig. 5.25 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+320.20 a 1+323.40 pertencente ao túnel de adução 4 frente B	94
Fig. 5.26 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+327.20 a 1+330.40 pertencente ao túnel de adução 4 frente B	95
Fig. 5.27 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+399.20 a 1+403.10 pertencente ao túnel de adução 4 frente B	95
Fig. 5.28 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+423.40 a 1+427.30 pertencente ao túnel de adução 4 frente B	96
Fig. 5.29 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+439.80 a 1+444.50 pertencente ao túnel de adução 4 frente B	96
Fig. 5.30 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+587.40 a 1+591.30 pertencente ao túnel de adução 4 frente B	97
Fig. 5.31 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+751.50 a 0+757.00 pertencente ao túnel de adução 4 frente C	97
Fig. 5.32 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+757.00 a 0+763.50 pertencente ao túnel de adução 4 frente C	98
Fig. 5.33 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+770.50 a 0+776.00 pertencente ao túnel de adução 4 frente C	98
Fig. 5.34 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de 0+867.00 a 0+872.50 pertencente ao túnel de adução 4 frente C	99
Fig. 5.35 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+988.00 a 0+994.00 pertencente ao túnel de adução 4 frente C	99
Fig. 5.36 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+907.60 a 0+912.00 pertencente ao túnel de adução 5 frente B	100

Fig. 5.37 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+927.70 a 0+930.90 pertencente ao túnel de adução 5 frente B	100
Fig. 5.38 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+930.90 a 0+934.70 pertencente ao túnel de adução 5 frente B	101
Fig. 5.39 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+142.80 a 1+147.10 pertencente ao túnel de adução 5 frente B	101
Fig. 5.40 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+304.50 a 1+308.80 pertencente ao túnel de adução 5 frente B	102
Fig. 5.41 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+345.20 a 1+349.20 pertencente ao túnel de adução 5 frente B	102
Fig. 5.42 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+361.70 a 1+365.30 pertencente ao túnel de adução 5 frente B	103
Fig. 5.43 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+480.00 a 0+486.00 pertencente ao túnel de adução 5 frente C	103
Fig. 5.44 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+564.00 a 0+569.50 pertencente ao túnel de adução 5 frente C	104
Fig. 5.45 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+790.00 a 0+796.00 pertencente ao túnel de adução 5 frente C	104
Fig. 5.46 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+850.00 a 0+855.50 pertencente ao túnel de adução 5 frente C	105
Fig. 5.47 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+866.50 a 0+872.50 pertencente ao túnel de adução 5 frente C	105
Fig. 5.48 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+094.49 a 1+099.10 pertencente ao túnel de adução 6 frente B	106
Fig. 5.49 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+771.50 a 0+707.00 pertencente ao túnel de adução 6 frente C	106

Fig. 5.50 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+822.50 a 0+829.00 pertencente ao túnel de adução 6 frente C	107
Fig. 5.51 - Gráfico de frequências obtido a partir dos 48 valores de Q - Barton estimados em Obra	111
Fig. 5.52 - Gráfico de frequências obtido a partir dos 3252 valores de Q - Barton calculados	112
Fig. 5.53 - Gráficos com a evolução da escavação em cada um dos túneis de adução, assinalando com cores diferentes a classe de maciço rochoso de cada avanço. Para o túnel TA01 identifica-se o esquema de frentes de desmonte que foi estabelecido para todos os túneis	115
Fig. A1 – Secção Geológica – Túneis de adução	131
Fig. A2 - Características do maciço rochoso gnaissico dos túneis de adução.	132
Fig. A3 - Falhas cartografadas dos tipos I, II e III nos túneis de adução.	133
Fig. A4 - Zonas de falha definidas nos túneis de adução.	133
Fig. B1 - Caracterização da alteração (A) do maciço rochoso	136
Fig. B2 - Caracterização da coerência / consistência (C) do maciço rochoso	136
Fig. B3 - Caracterização da fraturação (F) do maciço rochoso	137
Fig. B4 - Caracterização da Regularidade / Rugosidade da superfície	137
Fig. B5 - Caracterização do tipo de contacto (P) entre as paredes das descontinuidades	138
Fig. B6 - Caracterização da abertura (E) das descontinuidades	138
Fig. B7 - Caracterização da alteração (a) das paredes das descontinuidades	139
Fig. B8 - Caracterização do espaçamento (f) das descontinuidades	139
Fig. B9 - Caracterização da continuidade ou persistência (L) das descontinuidades	140
Fig. C1 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+871.70 a 0+875.60 pertencente ao túnel de adução 1, frente B	142
Fig. C2 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+961.90 a 0+966.10 pertencente ao túnel de adução 1, frente B	142
Fig. C3 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+285.50 a 1+288.30 pertencente ao túnel de adução 1, frente B	143
Fig. C4 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+370.70 a 1+373.80 pertencente ao túnel de adução 1, frente B	143
Fig. C5 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+384.80 a 1+388.50 pertencente ao túnel de adução 1, frente B	144
Fig. C6 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+825.00 a 0+831.00 pertencente ao túnel de adução 1, frente C	144
Fig. C7 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+006.80 a 1+010.90 pertencente ao túnel de adução 2, frente B	145
Fig. C8 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+329.40 a 1+331.50 pertencente ao túnel de adução 2, frente B	145

Fig. C9 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+412.70 a 1+416.60 pertencente ao túnel de adução 2,frente B	146
Fig. C10 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+342.00 a 0+348.00 (A) pertencente ao túnel de adução 2,frente C	146
Fig. C11 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+342.00 a 0+348.00(B) pertencente ao túnel de adução 2,frente C	147
Fig. C12 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+501.50 a 0+506.00 pertencente ao túnel de adução 2,frente C	147
Fig. C13 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+881.50 a 0+885.50 pertencente ao túnel de adução 2,frente C	148
Fig. C14 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+361.70 a 1+365.90 pertencente ao túnel de adução 3,frente B	148
Fig. C15 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+406.10 a 1+410.50 pertencente ao túnel de adução 3,frente B	149
Fig. C16 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+117.80 a 1+121.10 pertencente ao túnel de adução 3,frente B	149
Fig. C17 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+692.00 a 0+698.00 (A) pertencente ao túnel de adução 3,frente C	150
Fig. C18 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+692.00 a 0+698.00 (B) pertencente ao túnel de adução 3,frente C	150
Fig. C19 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+804.00 a 0+810.00 pertencente ao túnel de adução 3,frente C	151
Fig. C20 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+904.50 a 0+910.50 pertencente ao túnel de adução 3,frente C	151
Fig. C21 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+005.60 a 1+008.90 pertencente ao túnel de adução 4,frente B	152
Fig. C22 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+030.70 a 1+034.80 pertencente ao túnel de adução 4,frente B	152
Fig. C23 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+113.30 a 1+117.40 pertencente ao túnel de adução 4,frente B	153
Fig. C24 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+201.30 a 1+205.40 pertencente ao túnel de adução 4,frente B	153
Fig. C25 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+320.20 a 1+323.40 pertencente ao túnel de adução 4,frente B	154
Fig. C26 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+327.20 a 1+330.40 pertencente ao túnel de adução 4,frente B	154
Fig. C27 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+399.20 a 1+403.10 pertencente ao túnel de adução 4,frente B	155

Fig. C28 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+423.40 a 1+427.30 pertencente ao túnel de adução 4,frente B.....	155
Fig. C29 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+439.80 a 1+444.50 pertencente ao túnel de adução 4,frente B.....	156
Fig. C30 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+587.40 a 1+591.30 pertencente ao túnel de adução 4,frente B.....	156
Fig. C31 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+751.50 a 0+757.00 pertencente ao túnel de adução 4,frente C.....	157
Fig. C32 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+757.00 a 0+763.50 pertencente ao túnel de adução 4,frente C.....	157
Fig. C33 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+770.50 a 0+776.00 pertencente ao túnel de adução 4,frente C.....	158
Fig. C34 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+867.00 a 0+872.50 pertencente ao túnel de adução 4,frente C.....	158
Fig. C35 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+988.00 a 0+994.00 pertencente ao túnel de adução 4,frente C.....	159
Fig. C36 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+907.60 a 0+912.00 pertencente ao túnel de adução 5,frente B.....	159
Fig. C37 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+927.70 a 0+930.90 pertencente ao túnel de adução 5,frente B.....	160
Fig. C38 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+930.90 a 0+934.70 pertencente ao túnel de adução 5,frente B.....	160
Fig. C39 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+142.80 a 1+147.10 pertencente ao túnel de adução 5,frente B.....	161
Fig. C40 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+304.50 a 1+308.80 pertencente ao túnel de adução 5,frente B.....	161
Fig. C41 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+345.20 a 1+349.20 pertencente ao túnel de adução 5,frente B.....	162
Fig. C42 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+361.70 a 1+365.30 pertencente ao túnel de adução 5,frente B.....	162
Fig. C43 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+480.00 a 0+486.00 pertencente ao túnel de adução 5,frente C.....	163
Fig. C44 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+564.00 a 0+569.50 pertencente ao túnel de adução 5,frente C.....	163
Fig. C45 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+790.00 a 0+796.00 pertencente ao túnel de adução 5,frente C.....	164
Fig. C46 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+850.00 a 0+855.50 pertencente ao túnel de adução 5,frente C.....	164

Fig. C47 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+866.50 a 0+872.50 pertencente ao túnel de adução 5,frente C	165
Fig. C48 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+094.40 a 1+099.10 pertencente ao túnel de adução 6,frente B	165
Fig. C49 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+701.50 a 0+707.00 pertencente ao túnel de adução 6,frente C	166
Fig. C50 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+822.50 a 0+829.00 pertencente ao túnel de adução 6,frente C	166

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1- Classificação RMR (Bieniawski, 1989)	5
Tabela 2.2- Pesos dos respetivos parâmetros na classificação RMR (Bieniawski, 1989)	7
Tabela 2.3- Classificação das condições das descontinuidades (Bieniawski, 1989)	8
Tabela 2.4- Efeito da orientação das descontinuidades (Bieniawski, 1989)	8
Tabela 2.5 – RQD – Designação da qualidade da rocha (Deere et al.1967)	19
Tabela 2.6- J_n - Índice das famílias de diáclases.....	19
Tabela 2.7- J_r – Índice de rugosidade das diáclases	21
Tabela 2.8- J_a – Grau de alteração das Descontinuidades	22
Tabela 2.9- J_w – Índice das condições hidrogeológicas.....	23
Tabela 2.10- SRF – Fator de redução de tensões.....	25
Tabela 2.11 -ESR-índice de segurança (Barton et al. 1974)	28
Tabela 2.12- ESR-Valores de índice de segurança a considerar para túneis TBM	28
Tabela 2.13- Estimativa do comprimento de pregagens e ancoragens.....	29
Tabela 3.1- Zonas de falha (ZF) dos 6 túneis de adução	40
Tabela 3.2 - Famílias de descontinuidades definidas em trechos de 200 m no túnel de adução 3	49
Tabela 3.3- Classificação do maciço rochoso e respetivos meios de suporte utilizados no tratamento geotécnico dos túneis de adução do circuito hidráulico.....	50
Tabela 4.1 - Características das amostras do estudo.....	56
Tabela 4.2 - Quantidades de valores considerados neste estudo para cada parâmetro do Q - Barton	56
Tabela 4.3 - Zona cartografa dos casos de estudo.....	59
Tabela 4.4 - Valores de RQD estimado em obra e calculado pelos três métodos: J_v , λ e in situ	61
Tabela 4.5 - Número de polos mínimo para constituir famílias de descontinuidades	64
Tabela 4.6 - Definição de famílias de descontinuidades para a secção de estudo TA01B (0+871,70 a 0+875,60)	64
Tabela 4.7 - Valores do parâmetro J_n obtidos	69
Tabela 4.8 - Exemplificação do procedimento tomado na obtenção do parâmetro J_r (0+871,70 a 0+875,60)	72
Tabela 4.9 - Valores do parâmetro J_r considerados neste estudo	73
Tabela 4.10 - Peso do parâmetro J_a relativamente às características das descontinuidades (tipo de contacto /abertura /alteração)	75
Tabela 4.11 - Exemplificação do procedimento tomado na obtenção do parâmetro J_a (TA01B 0+871,70 a 0+875,60)	76

Tabela 4.12 - Valores de J_a obtidos para os 48 avanços estudados	77
Tabela 4.13 - Número de combinações do índice Q - Barton	79
Tabela 5.1 - Análise estatística dos casos de estudo	108
Tabela 5.2 – Tabela de frequências obtida através dos 48 valores de Q - Barton estimados em obra	110
Tabela 5.3 - Tabela de frequências obtida através dos 3252 valores de Q - Barton calculado pela combinação de parâmetros	111
Tabela 5.4 - Percentagem da amostragem organizada por classe de maciço para os valores de Q - Barton estimados em obra e calculados pela combinação de parâmetros.....	112
Tabela 5.5 - Síntese dos dados utilizados para caracterizar o avanço em escavação subterrânea em túnel	114
Tabela 5.6 - Caracterização dos avanços em escavação subterrânea em túnel	116
Tabela 5.7 - Custos de tratamentos geotécnicos para 10 metros de avanço em maciço classe I	117
Tabela 5.8 - Custos de tratamentos geotécnicos para 10 metros de avanço em maciço classe II	117
Tabela 5.9 - Custos de tratamentos geotécnicos para 10 metros de avanço em maciço classe III ...	118
Tabela 5.10 - Custos de tratamentos geotécnicos para 10 metros de avanço em maciço classe IV	118
Tabela 5.11 - Custos de tratamentos geotécnicos para 10 metros de avanço em maciço classe V .	119
Tabela 5.12 - Número de dias de trabalho e custo dos tratamentos geotécnicos definido por classe de qualidade de maciço para os 48 casos de estudo classificados pelo técnico de frente de obra	120
Tabela 5.13 - Número de dias de trabalho e custo dos tratamentos geotécnicos definidos por classe de qualidade de maciço, para os 48 casos de estudo classificados através da combinação dos parâmetros calculados.....	120
Tabela A1 – Parâmetros da classificação de Barton, índice Q e Classe de maciço estimados em obra	134
Tabela D1 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+871.70 a 0+875.60 pertencente ao túnel de adução 1, frente B	168
Tabela D2 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+961.90 a 0+966.10 pertencente ao túnel de adução 1, frente B	168
Tabela D3 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+285.50 a 1+288.30 pertencente ao túnel de adução 1, frente B	168
Tabela D4 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+370.70 a 1+373.80 pertencente ao túnel de adução 1, frente B	169
Tabela D5 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+384.80 a 1+388.50 80 pertencente ao túnel de adução 1, frente B	169
Tabela D6 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+825.00 a 0+831.00 pertencente ao túnel de adução 1, frente C	169
Tabela D7 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+006.80 a 1+010.90 pertencente ao túnel de adução 2, frente B	170

Tabela D8 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+329.40 a 1+331.50 pertencente ao túnel de adução 2, frente B	170
Tabela D9 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+412.70 a 1+416.60 pertencente ao túnel de adução 2, frente B	170
Tabela D10 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+342.00 a 0+348.00 (A) pertencente ao túnel de adução 2, frente C	171
Tabela D11 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+342.00 a 0+348.00 (B) pertencente ao túnel de adução 2, frente C	171
Tabela D12 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+501.50 a 0+506.00 pertencente ao túnel de adução 2, frente C	171
Tabela D13 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+881.50 a 0+885.50 pertencente ao túnel de adução 2, frente C	172
Tabela D14 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+361.70 a 1+365.90 pertencente ao túnel de adução 3, frente B	172
Tabela D15 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+406.10 a 1+410.50 pertencente ao túnel de adução 3, frente B	172
Tabela D16 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+117.80 a 1+121.10 pertencente ao túnel de adução 3, frente B	173
Tabela D17 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+692.00 a 0+698.00 (A) pertencente ao túnel de adução 3, frente C	173
Tabela D18 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+692.00 a 0+698.00 (B) pertencente ao túnel de adução 3, frente C	173
Tabela D19 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+804.00 a 0+810.00 pertencente ao túnel de adução 3, frente C	174
Tabela D20 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+904.50 a 0+910.50 pertencente ao túnel de adução 3, frente C	174
Tabela D21 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+005.60 a 1+008.90 pertencente ao túnel de adução 4, frente B	174
Tabela D22 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+030.70 a 1+034.80 pertencente ao túnel de adução 4, frente B	175
Tabela D23 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+113.30 a 1+117.40 pertencente ao túnel de adução 4, frente B	175
Tabela D24 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+201.30 a 1+205.40 pertencente ao túnel de adução 4, frente B	175
Tabela D25 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+320.20 a 1+323.40 pertencente ao túnel de adução 4, frente B	176
Tabela D26 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+327.20 a 1+330.40 pertencente ao túnel de adução 4, frente B	176

Tabela D27 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+399.20 a 1+403.10 pertencente ao túnel de adução 4, frente B	176
Tabela D28 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+423.40 a 1+427.30 pertencente ao túnel de adução 4, frente B	177
Tabela D29 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+439.80 a 1+444.50 pertencente ao túnel de adução 4, frente B	177
Tabela D30 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+587.40 a 1+591.30 pertencente ao túnel de adução 4, frente B	177
Tabela D31 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+751.50 a 0+757.00 pertencente ao túnel de adução 4, frente C	178
Tabela D32 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+757.00 a 0+763.50 pertencente ao túnel de adução 4, frente C	178
Tabela D33 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+770.50 a 0+776.00 pertencente ao túnel de adução 4, frente C	178
Tabela D34 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+867.00 a 0+872.50 pertencente ao túnel de adução 4, frente C	179
Tabela D35 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+988.00 a 0+994.00 pertencente ao túnel de adução 4, frente C	179
Tabela D36 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+907.60 a 0+912.00 pertencente ao túnel de adução 5, frente B	180
Tabela D37 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+927.70 a 0+930.90 pertencente ao túnel de adução 5, frente B	180
Tabela D38 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+930.90 a 0+934.70 pertencente ao túnel de adução 5, frente B	181
Tabela D39 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+142.80 a 1+147.10 pertencente ao túnel de adução 5, frente B	181
Tabela D40 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+304.50 a 1+308.80 pertencente ao túnel de adução 5, frente B	181
Tabela D41 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+345.20 a 1+349.20 pertencente ao túnel de adução 5, frente B	182
Tabela D42 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+361.70 a 1+365.30 pertencente ao túnel de adução 5, frente B	182
Tabela D43 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+480.00 a 0+486.00 pertencente ao túnel de adução 5, frente C	183
Tabela D44 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+564.00 a 0+569.50 pertencente ao túnel de adução 5, frente C	183
Tabela D45 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+790.00 a 0+796.00 pertencente ao túnel de adução 5, frente C	183

Tabela D46 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+850.00 a 0+855.50 pertencente ao túnel de adução 5, frente C	184
Tabela D47 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+866.50 a 0+872.50 pertencente ao túnel de adução 5, frente C	184
Tabela D48 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+094.40 a 1+099.10 pertencente ao túnel de adução 6, frente B	184
Tabela D49 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+701.50 a 0+707.00 pertencente ao túnel de adução 6, frente C	185
Tabela D50 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+822.50 a 0+829.00 pertencente ao túnel de adução 6, frente C	185

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

RMR - “*Rock Mass Rating*”

GSI - “*Geological Strength Index*”

a - Constante do Método de Hoek-Brown

s - Constante do Método de Hoek-Brown

σ_1' - Tensão Efetiva Máxima de Rotura

σ_3' - Tensão Efetiva Mínima de Rotura

m_b - Constante de Massa de Hoek e Brown para Maciços Rochosos

σ_c - Resistência à Compressão Uniaxial

Q - Índice de Qualidade

RQD - “*Rock Quality Designation*”

J_n - Índice das Famílias de Diáclases

J_r - Índice de Rugosidade das Diáclases

J_a - Grau de Alteração das Descontinuidades

J_w - Índice das Condições Hidrogeológicas

SRF - “*Stress Reduction Factor*”

E - Módulo de Elasticidade

NATM - “*New Austrian Tunnelling Method*”

J_v - “*Volumetric Joint Count*”

λ - Frequência Média das Descontinuidades por Metro

ESR - “*Excavation Support Ratio*”

d_e - Dimensão Equivalente

RRS - “*Reinforced Ribs of Sprayed Concrete*”

1

INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo os métodos de classificação de maciços rochosos têm vindo a ser atualizados e aperfeiçoados, com vista a definir e caracterizar de forma cada vez mais precisa os respetivos maciços. Recolhem-se as informações necessárias para, numa fase inicial projetar e pré-dimensionar estruturas subterrâneas como túneis, cavernas, poços, ou até mesmo fundações de estruturas de grande porte.

No entanto, ao contrário da caracterização dos solos, quando falamos em classificações de maciços rochosos, particularmente para obras subterrâneas, não existe nenhuma metodologia ou sistema de classificação universalmente aceite pela comunidade, com vista a ser utilizado na generalidade deste tipo de obras. Existem vários sistemas de classificação distintos, cada um com as suas especificações e particularidades, utilizados consoante a escolha e preferência do projetista.

Um dos sistemas de classificação mais utilizados para os maciços rochosos é o sistema de Q - Barton proposto por Barton, Lien e Lund [1]. Este, devido à sua simplicidade e rapidez, tem sido aceite de forma crescente na comunidade de geotecnia para fins de dimensionamento. No entanto, tal como noutras classificações, a avaliação da qualidade do maciço depende dos parâmetros caracterizadores do maciço e da forma como estes são definidos na frente de obra.

Neste enquadramento, pretende-se com este trabalho quantificar as incertezas e os erros cometidos na parametrização do sistema de classificação de Q - Barton, assim como as consequências associadas a uma classificação imprecisa do maciço rochoso. Utilizando como base do estudo dados reais obtidos na escavação de um circuito hidráulico em construção, procurou-se traduzir o impacto de uma incorreta definição dos parâmetros sob duas formas: (i) nos custos de execução dos tratamentos geotécnicos; (ii) nos dias de trabalho necessários para executar esses tratamentos.

Partindo das soluções de tratamento geotécnico que foram implementadas na frente de obra em função do Q - Barton baseado em parâmetros estimados com maior ou menor carga de empirismo, neste estudo otimizou-se a determinação do índice Q - Barton maximizando os métodos de quantificação objetiva dos parâmetros base.

Considera-se que o afastamento entre o Q - Barton determinado em frente de obra e o Q - Barton quantificado neste estudo constitui um fator de risco geotécnico que será possível eliminar em obras subterrâneas.

A amostra utilizada neste estudo não é representativa da obra em questão uma vez que o critério de amostragem foi, por opção, condicionado e dirigido. Ao revés, poder-se-á afirmar que a amostra representa uma hipotética obra real que se reveja no conjunto de casos estudados.

Assim, no capítulo 2 são apresentadas algumas das classificações geomecânicas de maciços rochosos mais utilizadas, dando mais ênfase, devido à natureza do trabalho, à classificação de Barton e seus parâmetros de base.

No capítulo 3 será apresentado o circuito hidráulico do aproveitamento hidráulico que serviu de base a este trabalho. É efetuada uma caracterização geológica e geotécnica do local de implantação do circuito, assim como de cada um dos seis túneis de adução de onde foi feita a amostragem.

No capítulo 4 é apresentada a amostragem de estudo e são descritos os procedimentos e critérios utilizados na otimização do cálculo dos parâmetros de base do índice Q - Barton - RQD, J_n , J_a e J_r - que são tratados estatisticamente e comparados com os valores estimados e utilizados no dimensionamento em obra.

No capítulo 5, são apresentados os valores de Q - Barton calculados de forma estatística a partir da quantificação dos parâmetros de base, que são comparados com os valores estimados e adotados no processo construtivo em obra. Procedeu-se, ainda, a uma análise global dos valores de Q - Barton, com vista a quantificar o peso e consequências – risco geotécnico – que a avaliação empírica e subjetiva dos parâmetros de base teria numa obra, particularmente em termos de aumento de custos de tratamentos geotécnicos e em acréscimo de dias de trabalho.

Por último, no capítulo 6, são efectuadas as considerações finais a todo este trabalho, abordando as conclusões retiradas com base nos valores obtidos e com considerações finais para trabalhos futuros.

2

CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

2.1. INTRODUÇÃO

Em qualquer túnel, um cuidadoso reconhecimento geológico-geotécnico constitui uma das chaves de sucesso, sendo uma das principais ferramentas senão a principal para evitar custos adicionais, acidentes e atrasos indesejáveis na obra. Contudo é impossível definir com elevada precisão o comportamento e resistência dos maciços rochosos enquanto estrutura, uma vez que não é possível uma observação plena do respectivo maciço e existe a possibilidade de uma variabilidade imensa; isto é, um mesmo maciço rochoso pode reagir de maneira diferenciada, conforme as solicitações que lhe são impostas que por sua vez dependem do tipo, das dimensões e particularidades da obra.

Na análise de terrenos para fins de engenharia civil, o ponto de partida para qualquer projeto e obra passa pela caracterização geológico-geotécnica do respectivo maciço rochoso – incluindo aqui eventuais horizontes de solo e o maciço rochoso propriamente dito. Esta caracterização tem como finalidade a definição de um conjunto de parâmetros que descrevam, com um grau de certeza consistente, o tipo, a qualidade e o comportamento do maciço rochoso. As características mais estudadas na análise do comportamento dos meios rochosos dizem respeito à deformabilidade, à resistência, à permeabilidade (em especial, no caso de obras hidráulicas) e ao estado de tensões naturais (sobretudo no caso de obras subterrâneas profundas). Estas classificações são um elemento essencial na aquisição dos dados para os estudos de caracterização, proporcionando dados em níveis de progressivo detalhe passíveis de serem atualizados conforme a evolução da obra.

2.2. CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS

As classificações geomecânicas são utilizadas para caracterizar o maciço rochoso através de um conjunto de propriedades identificadas por contacto direto com o maciço. Recorrendo a ensaios *in situ*, a amostras recolhidas em sondagens ou a própria observação do maciço é possível obter uma classificação qualitativa do terreno, prever o seu comportamento e o tipo de suporte necessário para uma determinada obra. Estes tipos de classificações apresentam-se como uma metodologia simples e objectiva de classificar os maciços rochosos e caracteriza-los a partir das suas propriedades geológico-geotécnicas, zonando os domínios geomecânicos em função da sua finalidade para projetos de engenharia. Entre as várias classificações geomecânicas referem-se no subcapítulo a seguir a classificação de Bienieawski (sistema RMR), o sistema GSI proposto por Hoek e Brown, e mais detalhadamente devido à natureza desta dissertação, a classificação de Barton (sistema Q - Barton).

É no entanto de salientar que estas classificações possuem importantes limitações, particularmente o carácter subjetivo dos diferentes parâmetros assim como as dificuldades inerentes à sua correta caracterização em frente de obra. A sua utilização não deve substituir as ferramentas de cálculo mais evoluídas, tais como as ferramentas baseadas em métodos numéricos/elementos finitos.

2.2.1. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE BIENIAWSWKY – RMR (“ROCK MASS RATING”)

O sistema RMR, um dos mais utilizados para a classificação de maciços rochosos, foi publicado inicialmente em 1979 e traduz a qualidade do maciço rochoso através de um valor compreendido entre 0 a 100, crescente em qualidade. À medida que um maior número de casos práticos foi sendo examinado, o sistema sofreu contínuos melhoramentos, nomeadamente uma grande atualização em 1989 que, no entanto, não alterou a base deste sistema. A classificação aqui descrita é referente a essa mesma versão (Bieniawski, 1989) [2] [3].

Este sistema baseia-se na consideração de seis parâmetros geológico-geotécnicos, aos quais se atribuem pesos relativos. O resultado do índice RMR é obtido através da soma algébrica dos pesos referidos da forma ilustrada na Figura 2.1. Consoante o valor obtido, o maciço rochoso é enquadrado numa das 5 classes qualitativas propostas pelo autor, como se demonstra na Tabela 2.1. Os parâmetros a considerar no sistema RMR são:

P1: Resistência à compressão uniaxial do material rochoso;

P2: Índice de qualidade RQD;

P3: Espaçamento das descontinuidades;

P4: Condições das descontinuidades;

P5: Condições da água subterrânea;

P6: Orientação das descontinuidades.

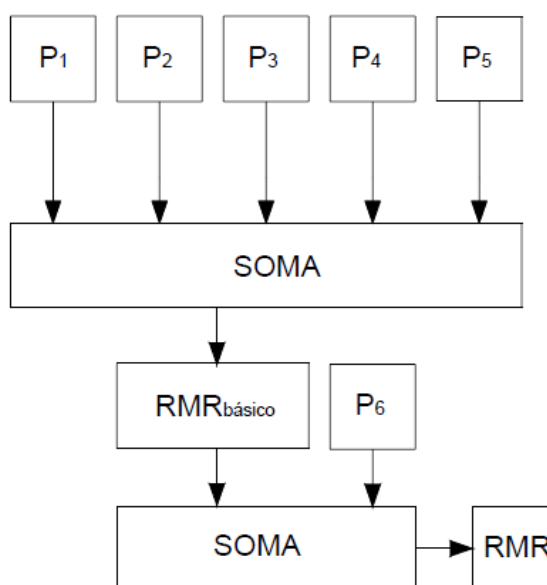


Fig. 2.1 - Representação gráfica da obtenção do valor de RMR

Tabela 2.1 - Classificação RMR (Bieniawski, 1989)

Valor RMR	Classe	Descrição	Tempo médio para aguentar sem suporte	Coesão (kpa)	Ângulo de atrito (°)
81 - 100	I	Maciço rochoso muito bom	20 anos para 15 m de vão	> 400	> 45
61 - 80	II	Maciço rochoso bom	1 ano para 10 m de vão	300 - 400	35 - 45
41 - 60	III	Maciço rochoso razoável	1 semana para 5 m de vão	200 - 300	25 - 35
21 - 40	IV	Maciço rochoso fraco	10 horas para 2,5 m de vão	100 - 200	15 - 25
<21	V	Maciço rochoso muito fraco	30 min para 1 m de vão	< 100	< 15

A Tabela 2.2 permite atribuir pesos relativos aos parâmetros constituintes do sistema RMR (com a exceção da orientação relativa das descontinuidades / escavação) permitindo, através da soma de cada peso atribuído, chegar a um valor de RMR representativo da qualidade do maciço. A partir deste valor o maciço é então enquadrado numa das cinco classes qualitativas, para as quais estão estimados os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb (coesão e ângulo de atrito de pico), período de tempo sem suporte e informações sobre a qualidade do maciço. O peso relativo às condições das descontinuidades na categoria 4 da Tabela 2.2, caso seja possível uma melhor avaliação e caracterização destas estruturas, deve ser determinado através da soma dos cinco parâmetros indicados na Tabela 2.3.

O último parâmetro relativo à orientação das descontinuidades, apresentado na Tabela 2.4, é definido separadamente dos outros parâmetros uma vez que é dependente do tipo de obra a realizar e da relação entre a atitude da descontinuidade e a orientação da frente de escavação. O valor de RMR é reajustado mediante a influência que as descontinuidades apresentam na obra em questão, podendo estas ser de carácter favorável ou não favorável. Esta classificação das atitudes das descontinuidades basta para a maioria dos propósitos práticos, no entanto este sistema não é adequado caso o comportamento do maciço rochoso seja dominado por aspectos estruturais, sendo nestes casos necessário considerar a geometria do maciço rochoso e da escavação [2] [4] [5].

É ainda de referir que este sistema de classificação é de carácter empírico e tal como qualquer outra classificação geomecânica não deve ser a única via a utilizar para a determinação de um suporte. Este deve ser dimensionado com rigor e detalhe recorrendo a ferramentas de modelação geotécnica e suportado por uma monitorização e uma caracterização geológico-geotécnica adequada.

Tabela 2.2 - Pesos dos respectivos parâmetros na classificação RMR (Bieniawski, 1989).

Parâmetros de classificação com pesos relativos									
Parâmetros			Coeficientes						
1	Resistência da rocha intacta (Mpa)	Índice de compressão puntiforme	>10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Ver compressão uniaxial		
		Resistência à compressão simples	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	<1
	PESOS		15	12	7	4	2	1	0
2	"RQD" (%)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25		
	PESOS		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento de juntas		> 2 m	0,6 a 2 m	20 - 60 cm	6 - 20 cm	< 6 cm		
	PESOS		20	15	10	8	5		
4	Condição das discontinuidades		Muito rugosa, não contínua, fechadas. Paredes não alteradas	Pouco rugosa, separação < 1 mm. Paredes ligeiramente e alteradas	Pouca rugosa, separação < 1 mm. Paredes muito alteradas	Estriada ou preenchim. < 5 mm ou juntas contínuas com separação 1 - 5 mm	Preenchim. mole > 5 mm ou juntas contínuas com separação > 5 mm		
	PESOS		30	25	20	10	0		
5	Nível de água	Infiltração em 10 m de comprimento de túnel (l/min)	Nenhum	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		(Pressão água nas diáclases/tensão principal máxima)	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Condições gerais	Completamente seco	Humidade (água intersticial)	Húmido	Escorrimentos	Fluxo contínuo (Problema grave de água)		
	PESOS		15	10	7	4	0		

Tabela 2.3 - Classificação das condições das descontinuidades (Bieniawski, 1989)

Classificação das descontinuidades com pesos relativos (RMR)					
Comprimento da descontinuidade (persistência)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
PESOS	6	4	2	1	0
Separação (abertura)	Nenhuma	< 0,1	0,1 - 1,0 m	1 - 5 m	> 5 m
PESOS	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugoso	Rugoso	Ligeiramente rugoso	Lisa	Estriada
PESOS	6	5	3	1	0
Preenchimento	Nenhum	Duro < 5 mm	Duro > 5 mm	Mole < 5 mm	Mole > 5 mm
PESOS	6	4	2	2	0
Alteração	Não alterada	Pouco alterada	Moderada	Alta	Decomposta
PESOS	6	5	3	1	0

Tabela 2.4 - Efeito da orientação das descontinuidades (Bieniawski, 1989)

Efeito da Orientação das descontinuidades com pesos relativos						
Direção perpendicular ao eixo do túnel				Direção paralela ao eixo do túnel		
Abertura da estrutura no sentido da inclinação		Abertura da estrutura no sentido inverso da inclinação		Inclinação 45° - 90°	Inclinação 20° - 45°	Inclinação 0° - 20°
Inclinação 45° - 90°	Inclinação 20° - 45°	Inclinação 45° - 90°	Inclinação 20° - 45°			
Muito Favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	Razoável	Razoável
Orientação das descontinuidades		Muito favorável	Favorável	Indiferente	Desfavorável	Muito desfavorável
PESOS	Túneis e minas	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

2.2.2. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE HOEK E BROWN – GSI (“GEOLOGICAL STRENGTH INDEX)

O sistema de classificação de maciços rochosos GSI, foi introduzido em 1995 por Evert Hoek com a finalidade de estimar a resistência e deformação de maciços rochosos sujeitos a diferentes condições geológicas e colmatar algumas deficiências que foram identificadas no sistema de classificação RMR na avaliação da resistência do maciço rochoso. Este sistema parte do contínuo desenvolvimento e aplicação do critério de rotura desenvolvido por Hoek (1994) e Hoek-Brown (1988) [6].

Neste sentido, e de forma a apresentar a classificação de Hoek & Brown de uma forma mais clara, é necessário fazer uma primeira abordagem ao critério de rotura desenvolvido anteriormente, pelo mesmo autor.

2.2.2.1. Critério de rotura de Hoek-Brown

De forma a quantificar de forma empírica a resistência dos maciços rochosos, Hoek e Brown (1980) estabeleceram, para rochas intactas, a partir da teoria inicial de Griffith, o denominado critério de resistência de Hoek e Brown traduzido pela expressão (1) em que σ_1' e σ_3' representam as tensões principais efetivas máxima e mínima na rotura respectivamente, σ_c a resistência à compressão simples e “ m_i ” uma constante da rocha intacta [7].

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \cdot \left(m_i \times \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + 1 \right)^{1/2} \quad (1)$$

Mais tarde os mesmos autores apresentaram um critério de resistência para os maciços rochosos que resultou da generalização da expressão (1) e se apresenta de seguida na expressão (2).

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \cdot \left(m_b \times \frac{\sigma_3'}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (2)$$

Onde:

σ_1' - Representa as tensões efetivas máximas de rotura;

σ_3' - Representa as tensões efetivas mínimas de rotura;

m_b - Valor reduzido do parâmetro m_i (constante de Hoek Brown para maciços rochosos);

a e s - Constantes dependentes das características do maciço rochoso;

σ_c - Resistência à compressão simples.

2.2.2.2. Classificação GSI

Com a finalidade de determinar os parâmetros constantes da equação (2), Hoek (1994) apresentou um sistema de classificação denominado *Geological Strength Index* (GSI), que permite obter um índice geotécnico limitado de 0 a 100 crescente com a qualidade do maciço rochoso. Este sistema sustenta-se no conceito de que a resistência de um determinado maciço rochoso não depende só das propriedades da rocha intacta, mas também da liberdade que os blocos rochosos têm de escorregar ou rodar sob diferentes condições de tensão. Esta liberdade é controlada tanto pela forma geométrica dos blocos de rocha intacta como também pelas condições da superfície das descontinuidades (Hoek, 1994) [8]. Trata-se de uma classificação fácil e rápida, baseada numa simples inspeção visual das condições geológicas, no entanto o valor obtido é estimado e não exato ou preciso, pelo que se recomenda a utilização de um intervalo de valores GSI em vez de um valor apenas.

São apresentadas nas Figuras 2.2 e 2.3, duas matrizes em forma de tabela que conjugam as condições da superfície das descontinuidades e a forma dos blocos de rocha intacta, permitindo obter um valor ou intervalo de valores de GSI representativos da qualidade do maciço rochoso. A Figura 2.2 aplica-se a blocos de maciços homogêneos, enquanto que a Figura 2.3 é aplicada a maciços rochosos heterogêneos existentes do tipo do *flysh* [9].

Depois de estimado o valor de GSI para o maciço, os parâmetros do critério de rotura de Hoek e Brown podem ser obtidos a partir das seguintes expressões (Hoek et al, 2002) [2] [7].

$$m_b = m_i \times e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14 \cdot D}\right)} \quad (3)$$

$$S = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3 \cdot D}\right)} \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot (e^{GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (5)$$

Onde D é o fator perturbação que tem em conta o grau de alteração a que o maciço rochoso foi sujeito devido ao uso de explosivos durante a escavação ou à libertação de tensões. Este valor varia entre 0 para maciços não perturbados e 1 para maciços extremamente perturbados.

Para maciços de qualidade mediana a boa ($GSI > 25$) o valor de m_b pode ainda ser determinado através da expressão 6 (Hoek & Brown, 1997).

$$m_b = m_i \times s^{1/3} \quad (6)$$





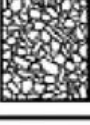

<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that $GSI = 35$. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		<p>SURFACE CONDITIONS</p> <p>VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces</p> <p>GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p> <p>FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces</p> <p>POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments</p> <p>VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p>				
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
<p>DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES</p> <p>↓</p>	 <p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90	80		N/A	N/A
	 <p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>		70			
	 <p>VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>		60			
	 <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>		50			
	 <p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>		40	30		
	 <p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>		20	10		
		N/A	N/A			

Fig. 2.2 - Estimativa do valor GSI com base na descrição geológica (Marinos & Hoek, 2000)

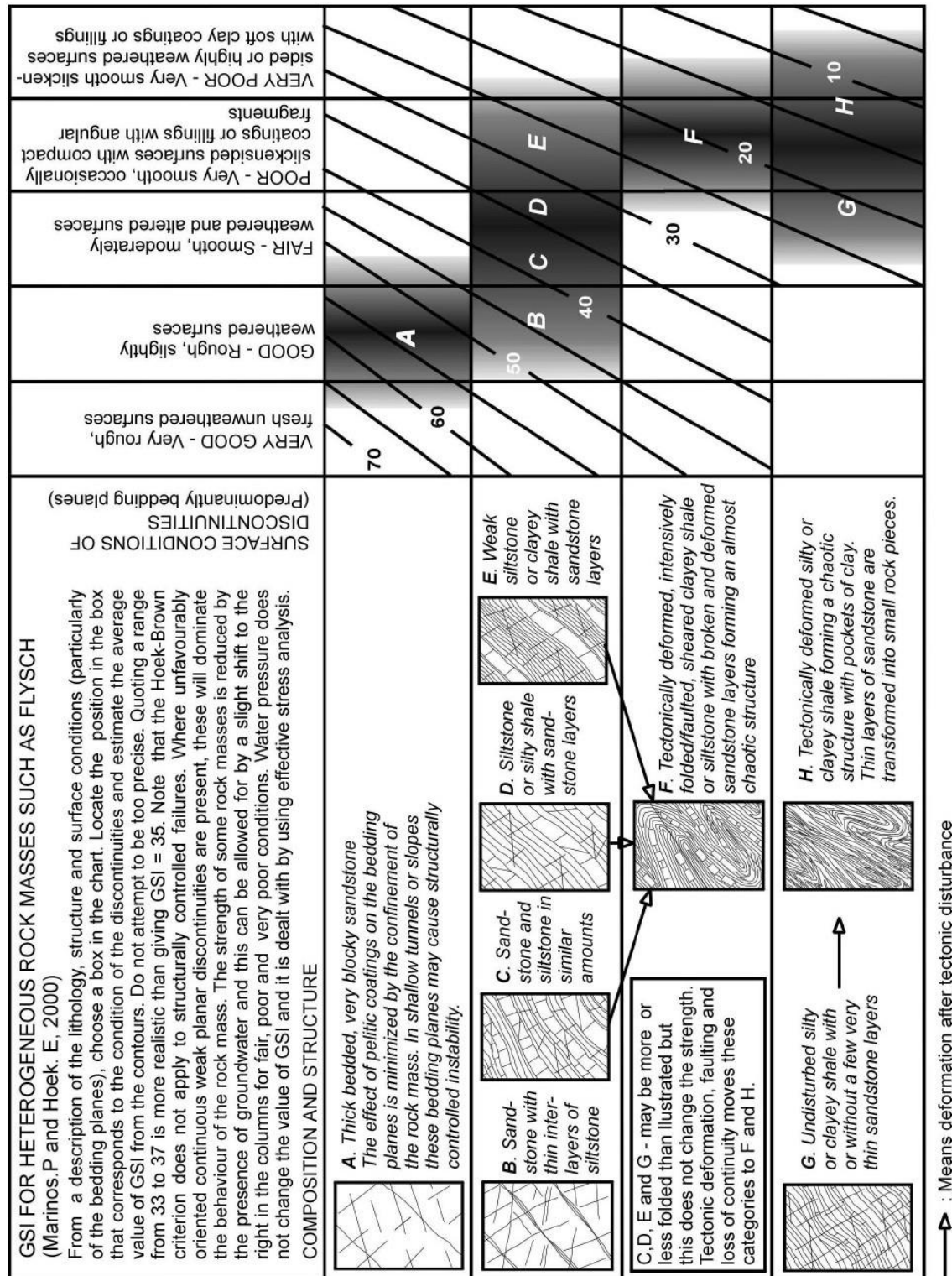


Fig. 2.3 - Estimativa do valor GSI para maciços rochosos heterogêneos como o flysch (Marino & Hoek, 2000)

2.3. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE BARTON – Q (“QUALITY INDEX”)

Esta classificação assenta na definição de um índice de qualidade Q baseado na análise de seis parâmetros considerados relevantes na definição e caracterização do comportamento dos maciços rochosos. O valor de Q permite definir classes qualitativas do maciço rochoso e obter informações sobre a estabilidade e necessidades de suporte em escavações subterrâneas, assim como o tipo e quantidade de suporte recomendado para um determinado maciço rochoso.

O índice Q é determinado pela expressão (7) e varia entre 10^{-3} e 10^3 . O significado dos seis parâmetros envolvidos na expressão de cálculo do Q - Barton é apresentado nos subcapítulos 2.3.3.1 a 2.3.3.6.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (7)$$

2.3.1. BREVE REFERÊNCIA À HISTÓRIA DA CLASSIFICAÇÃO DE BARTON

O sistema de classificação para maciços rochosos “Q de Barton” foi desenvolvido no NGI (*Norwegian Geotechnical Institute*) e teve início em 1970. Contudo, a sua primeira publicação foi feita por *Barton, Lien e Lunde* apenas em 1974 [1]. Este sistema foi desenvolvido como uma ferramenta de avaliação e classificação de maciços rochosos e do solo, com o objectivo de avaliar a necessidade e o tipo de suporte em túneis e cavernas rochosas. Este, originalmente, partiu do estudo de 200 casos de escavações subterrâneas maioritariamente escandinavos, através da combinação dos diferentes valores de Q com as dimensões dos túneis ou caverna estudados. Foi assim possível obter uma tabela de recomendação do suporte baseada nas características e suportes utilizados em cada caso.

O gráfico de suporte recomendado, presente na Figura 2.4, foi baseado na localização de cada caso, associado a uma dimensão equivalente e a um Q de Barton. Este gráfico está dividido em 38 blocos separando suportes diferentes de classificações do maciço diferentes, que variam de excepcionalmente pobre até excepcionalmente bom [10].

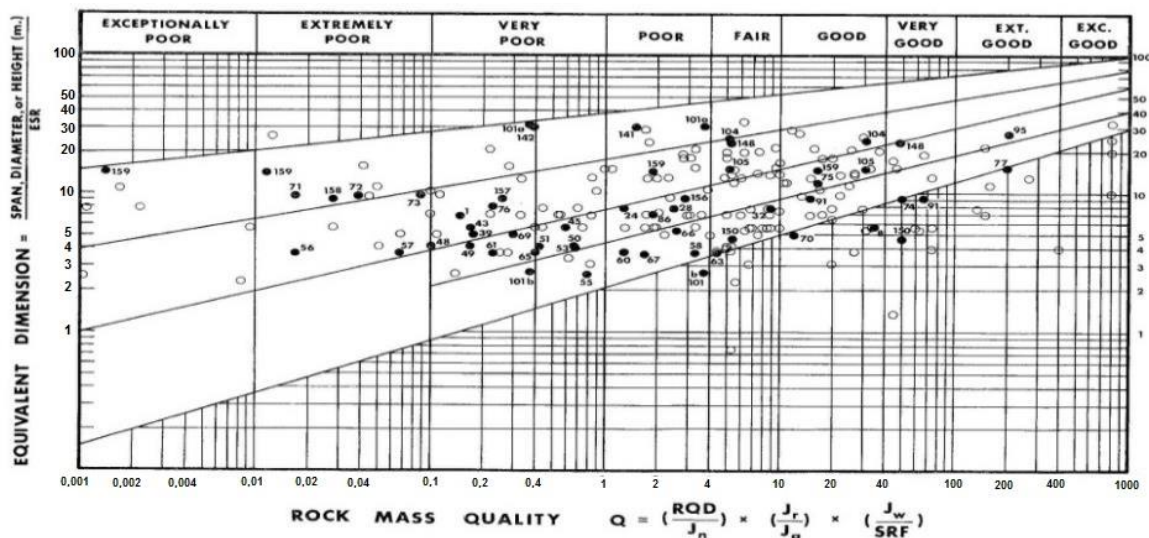


Fig. 2.4 - Gráfico de recomendação de suporte para o sistema de classificação Q - Barton (Barton et al. 1974)

De forma a acompanhar a evolução contínua das técnicas de suporte e da tecnologia, assim como os avanços sistemáticos da engenharia civil e geotecnia, também a classificação de Barton tem sido atualizada. Desde a sua introdução em 1974, esta sofreu duas importantes revisões no gráfico do suporte.

A primeira foi feita por Grimstad e Barton em 1993 baseada em 1050 exemplos de escavações subterrâneas maioritariamente na Noruega, simplificando o gráfico de recomendação de suporte definitivo como se demonstra na Figura 2.5 [11].

Em 2002 o sistema de Barton sofre a segunda grande atualização, baseada em 900 novos exemplos de escavações subterrâneas realizadas na Noruega, Suíça e Índia. Esta atualização integrou ainda, uma análise referente à relação da espessura, espaçamento e reforço das RRS (Reinforced Ribs of Sprayed Concrete) em função do carregamento e da qualidade do maciço (Grimstad et al. 2002) [12]. Um novo gráfico de recomendação de Suporte definitivo em função do Q - Barton foi desenvolvido como se pode ver na Figura 2.6 [10] [13] [14].

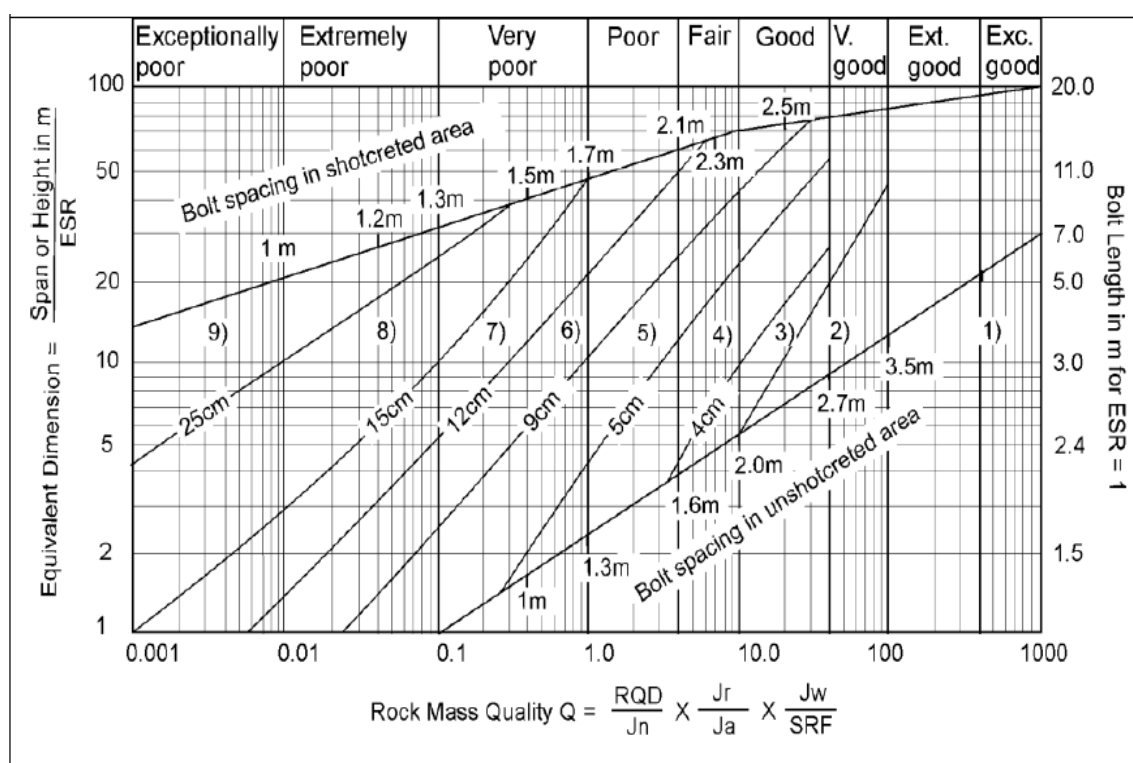


Fig. 2.5 - Classes de suporte estimadas para o sistema de classificação Q - Barton (Grimstad e Barton, 1993)

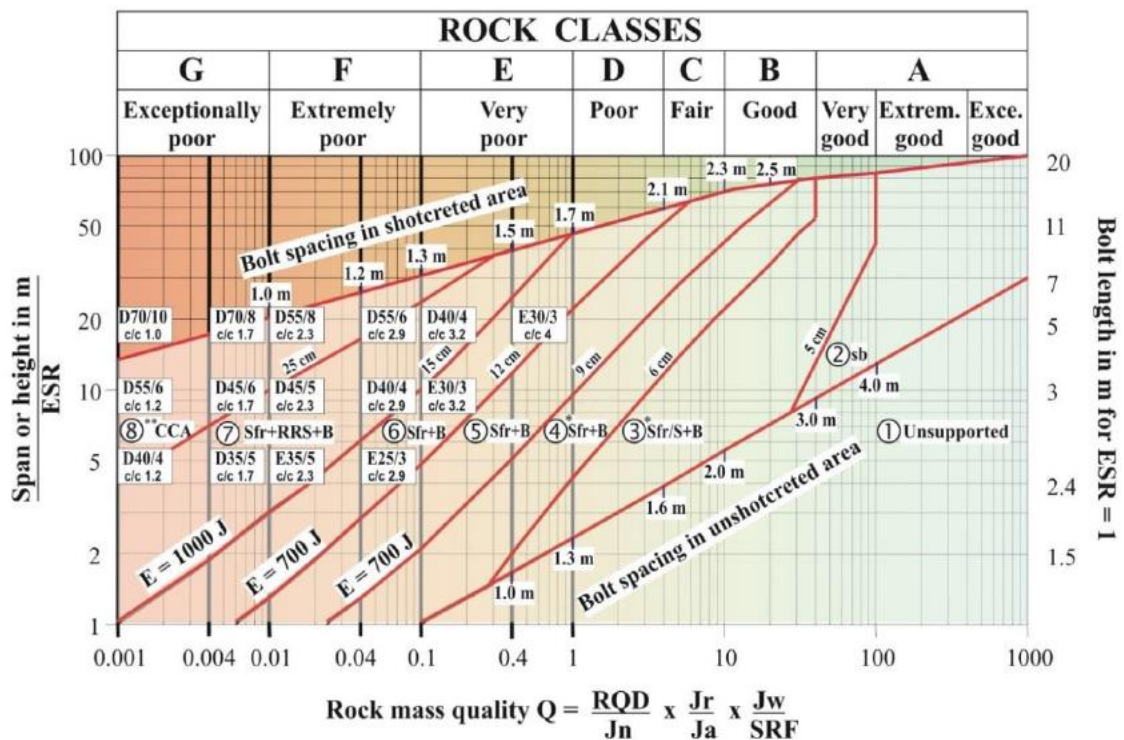


Fig. 2.6 - Classes de suporte estimadas para o sistema de classificação Q - Barton integrando a absorção de energia e os RRS (Grimstad et al. 2002)

2.3.2. ÁREAS DE APLICAÇÃO

O índice Q - Barton é mais preciso quando utilizado para classificar um maciço rochoso envolvente de uma escavação subterrânea. Contudo pode ser utilizado para mapeamento/zonamento geotécnico, para diagramas de sondagens e para investigação em perfurações, sendo que, para estes casos, a incerteza na parametrização é geralmente maior, requerendo uma maior precaução na sua estimativa. Este sistema pode ainda ser utilizado como um guia de decisão de suporte para maciços rochosos e para a documentação da qualidade destes mesmos.

Esta classificação não depende apenas das características do maciço, mas também da escavação subterrânea, da sua geometria e características [14].

2.3.3. PARÂMETROS E SUA DESCRIÇÃO

O índice Q - Barton pode ser determinado de diferentes maneiras, pelo zoneamento geológico de escavações profundas, à superfície, ou alternativamente por diagramas de sondagem, sendo que os valores mais precisos são determinados pelo mapeamento geológico de frentes de escavação\.

Durante o mapeamento é comum dividir a escavação em diferentes secções para que a variação do valor de Q - Barton seja moderada pois esta nunca deverá exceder uma classe de maciço no gráfico da figura 2.5 e 2.6. Cada um dos seis parâmetros da expressão (7) pode ser determinado recorrendo a tabelas que atribuem valores que vão penalizar ou favorecer o valor Q - Barton consoante o tipo de maciço. Os 3 quocientes constituintes dessa expressão podem ser entendidos da seguinte forma que passamos a evidenciar: [15]

- O primeiro quociente, RQD/J_n , caracteriza a estrutura do maciço definindo o tamanho relativo dos blocos no maciço rochoso. Este valor varia de 0,5 a 200 e dá uma noção das dimensões e formas reais dos blocos e da frequência das descontinuidades;
- O quociente J_r/J_a representa a resistência ao corte das descontinuidades do maciço rochoso, descrevendo a rugosidade e as características de fricção das descontinuidades com ou sem material de enchimento. É um quociente crescente com o aumento da rugosidade e decrescente com o aumento do grau de alteração das paredes das descontinuidades, situação em conformidade com um aumento da resistência ao corte. Este quociente diminui também com a abertura das descontinuidades e com o facto de apresentarem material de preenchimento;
- O terceiro quociente, J_w/SRF , representa um fator empírico denominado por “tensão ativa”. O fator J_w traduz a medida da pressão de água que contraria o efeito na resistência ao escorregamento das descontinuidades e o fator SRF caracteriza o estado de tensão do maciço rochoso.

Cada um dos parâmetros desta classificação geomecânica será descrito individualmente nos subcapítulos 2.3.3.1 a 2.3.3.6.

2.3.3.1. Parâmetro RQD

O Índice RQD, ou *Rock Quality Designation* foi definido por Deere em 1963 com o objectivo de ser aplicado como um simples sistema de classificação para a estabilidade do maciço rochoso, tendo sido utilizado para medir o grau do dano estrutural de rochas competentes [16]. O procedimento normal é recorrer a amostras obtidas em furos de sondagem - carotes ou testemunhos de sondagem - de forma a avaliar a integridade da rocha. O valor de RQD nestes casos é descrito como a percentagem determinada pelo quociente entre o somatório dos troços de carote com comprimento superior a 10 cm e o comprimento total furado em cada manobra (ver expressão (8)) [14].

Os procedimentos deste ensaio são indicados pela ISRM (*International Society for Rock Mechanics*).

$$RQD = \frac{\sum l_i \cdot (>10cm)}{L} \times 100 \quad (8)$$

Onde:

L - comprimento total furado numa manobra.

l_i - Troços de amostragem superiores a 10 cm.

Quando não é possível obter testemunhos de sondagens pode-se recorrer à análise dos traços das discontinuidades em afloramentos rochosos ou escavações, estimando-se o valor de RQD recorrendo a duas relações distintas, uma proposta por Palmström (1982) e outra por Priest & Hudson (1976) [17].

Segundo Palmström (1982) o valor de RQD pode ser estimado através do número de discontinuidades por unidade de volume através da expressão (9), onde J_v representa o índice volumétrico, que é definido pelo somatório do número de discontinuidades por unidade de comprimento para o conjunto das famílias (ver exemplo da Figura 2.7) [3].

$$RQD = 115 - 3,3 \times J_v \quad (9)$$

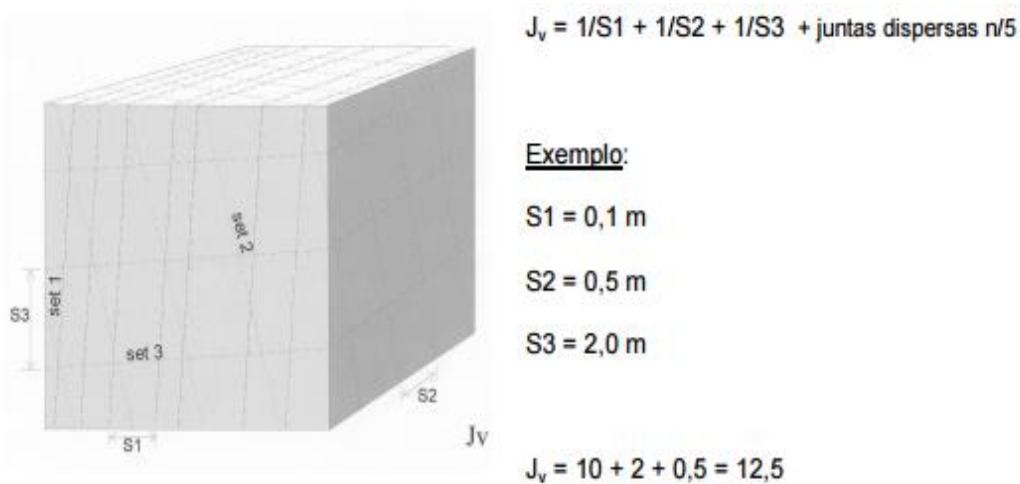


Fig. 2.7 - Exemplo de cálculo do índice volumétrico J_v (apontamentos de geologia da engenharia, FEUP)

Outra relação baseada em casos experimentais foi proposta por Priest & Hudson em 1976 e é traduzida na expressão (10). Esta relaciona o valor de RQD com a frequência média das discontinuidades por metro (parâmetro λ) medidas recorrendo a uma amostragem linear – *scanlines* – diretamente nos afloramentos ou, quando existem problemas de escala, fotos aéreas e imagens de satélites. Para valores de λ compreendidos entre 6 e 16 discontinuidades por metro, a equação (10) pode ser aproximada a uma expressão linear e os valores de RQD podem ser obtidos recorrendo à equação (11). Esta relação pode-se verificar através da Figura 2.8 que relaciona graficamente o índice RQD com o número de discontinuidades por metro (Priest & Hudson, 1976) [18].

Este método de estimar o RQD não é, no entanto, o mais adequado para caracterizar a competência de uma rocha, pois as descontinuidades não apresentam uma distribuição uniforme, ocorrendo agrupadas em conjuntos diferentemente orientados. Desta forma a frequência de ocorrência das descontinuidades vai variar com a direção escolhida para a *scanline*, influenciando o valor de RQD estimado.

$$RQD = 100 \times e^{-0,1 \cdot \lambda} \times (0,1 \cdot \lambda + 1) \quad (10)$$

$$RQD = -3,68 \cdot \lambda + 110,4 \quad (11)$$

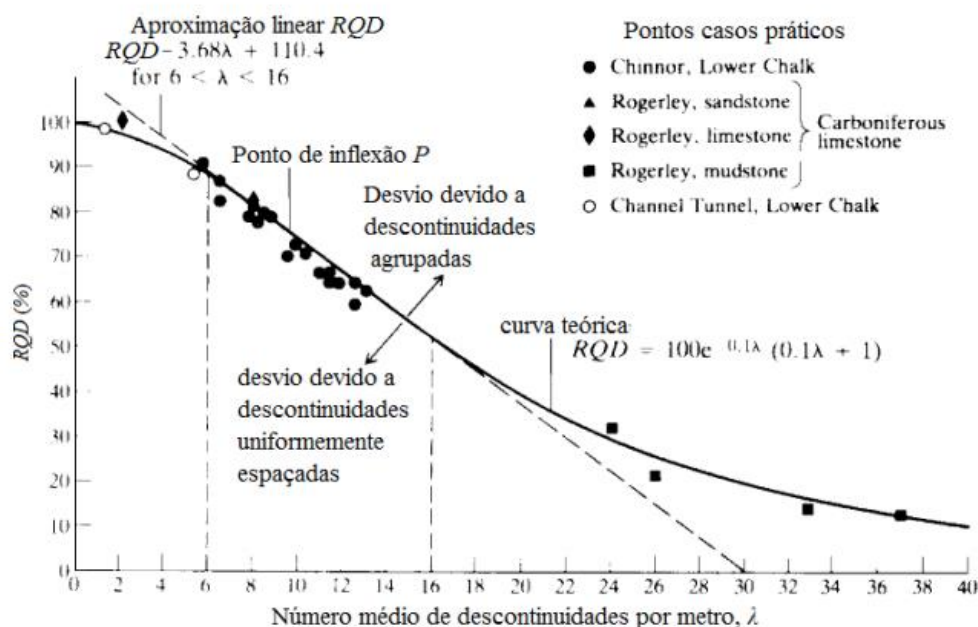


Fig. 2.8 - Relação entre o RQD e o número médio de descontinuidades por metro, λ (Priest & Hudson, 1976).

É de referir que o parâmetro RQD deve caracterizar a qualidade do maciço rochoso *in situ*. Quando se realizam sondagens em maciços com forte anisotropia, é frequente o desenvolvimento de novas fracturas segundos os planos de fraqueza, consequência da descompressão originada pela retirada da amostra. Na observação desta deve-se ser cuidadoso a distinguir as fraturas naturais das decorrentes do processo de furação. Do mesmo modo, quando se recorre à observação da superfície tendo em vista estimar o valor de RQD, as fraturas causadas por explosivos devem ser ignoradas [14].

Na Tabela 2.5 é apresentada a classificação proposta por Deere et al. (1967) que relaciona a qualidade do maciço rochoso com o valor de RQD obtido [19].

Tabela 2.5 - RQD - Designação da qualidade da rocha (Deere et al.)

	Descrição	RQD	Notas
A	Rocha de muito má qualidade	0 - 25	Quando RQD for <10 (incluindo 0) considera-se um valor nominal de 10 no cálculo de Q
B	Rocha de má qualidade	25 - 50	
C	Rocha de qualidade razoável	50 - 75	
D	Rocha de boa qualidade	75 - 90	A adoção de valores de RQD com intervalos de 5 é considerada adequada
E	Rocha de excelente qualidade	90 - 100	

2.3.3.2. Parâmetro J_n

O parâmetro J_n , que é definido em função do número de famílias de descontinuidades, não é necessariamente um indicador da fracturação da rocha, isto é, a um maciço bastante fraturado pode estar associado um pequeno número de famílias de descontinuidades e vice-versa. Uma família de descontinuidades é definida por um conjunto de descontinuidades com aproximadamente a mesma orientação e com um espaçamento característico, enquanto que descontinuidades que não ocorrem sistematicamente ou que estão espaçadas de vários metros são denominadas por descontinuidades aleatórias [15].

O que caracteriza uma família de descontinuidades para efeitos de cálculo do J_n não é apenas o espaçamento constante entre descontinuidades paralelas ou quase paralelas, mas também a extensão e altura da escavação subterrânea. Se o espaçamento entre descontinuidades for na generalidade maior que a extensão e altura da escavação, os blocos formados são demasiado grandes para deslizar, sendo que nestes casos as descontinuidades devem ser consideradas como aleatórias. Em escavações subterrâneas o número de famílias de descontinuidades pode não ser facilmente identificado diretamente. A maneira mais precisa de definir o parâmetro J_n passa pela utilização de programas de projecção estereográfica que permitem realizar análises estatísticas dos dados geológicos recolhidos no campo, nomeadamente, as orientações de superfícies de descontinuidades observadas *in situ* e em sondagens [14].

Na Tabela 2.6 apresenta-se os pesos atribuídos ao parâmetro J_n na classificação do Q - Barton de acordo com o número de famílias e descontinuidades aleatórias, salientando que o valor atribuído a este parâmetro é muito subjetivo ao observador, e a experiência é um fator preponderante na sua correta definição.

Tabela 2.6 - J_n - Índice das famílias de diáclases

	Descrição	J_n	Notas
A	Nenhuma ou poucas descontinuidades	0,5 – 1,0	Nas intersecções utilizar $3^* J_n$
B	Uma família de descontinuidades	2	
C	Uma família mais descontinuidades aleatórias	3	
D	Duas famílias de descontinuidades	4	
E	Duas famílias mais descontinuidades aleatórias	6	
F	Três famílias de descontinuidades	9	Nas embocaduras utilizar $2^* J_n$
G	Três famílias mais descontinuidades aleatórias	12	
H	Quatro ou mais famílias, descontinuidades aleatórias, maciços muito fraturados	15	
I	Rocha esmagada, tipo terroso	20	

2.3.3.3. Parâmetro J_r

A fricção de uma determinada descontinuidade é dependente da natureza das paredes da descontinuidade - se esta é ondulada, planar, rugosa ou suave - e é caracterizada pelo índice J_r . Na determinação deste parâmetro, a descrição das descontinuidades é baseada nas características geométricas, que condicionam as propriedades mecânicas, em duas escalas, como se pode verificar na Figura 2.9.

Em macro escala as características geométricas descrevem-se como a regularidade da superfície. A regularidade é medida numa escala de decímetros ou metros, com a ajuda de uma régua, e deve ter em consideração o tamanho dos blocos formados assim como a direção de deslizamento mais provável. As descontinuidades são avaliadas como irregulares ou em patamares, onduladas ou planares.

A rugosidade reporta-se às características geométricas da superfície na escala da amostra de mão. Os termos rugosa, lisa e espelhada referem-se a pequenas estruturas numa escala de milímetros ou centímetros e são medidos pela simples observação da descontinuidade [14].

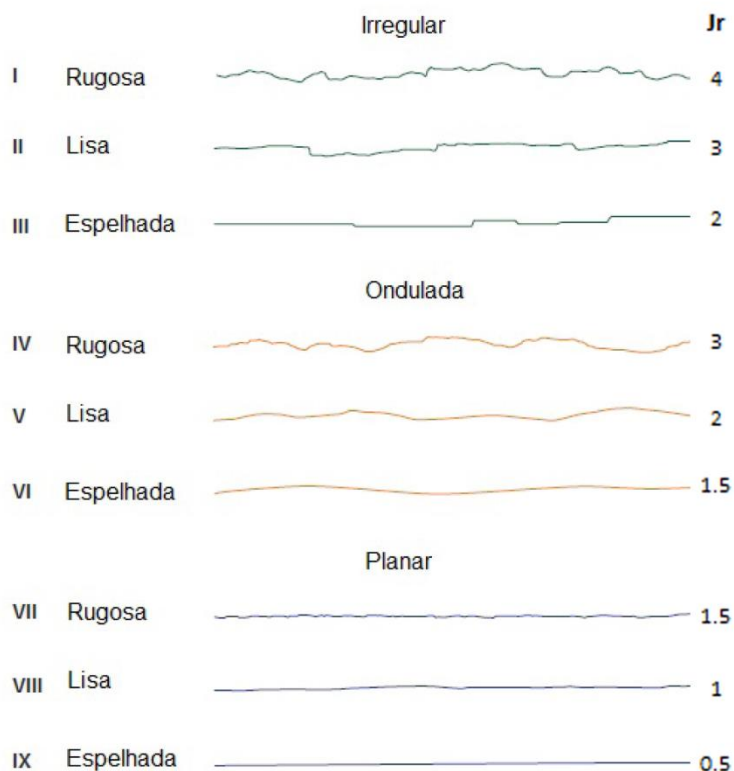


Fig. 2.9 - Exemplos de paredes de descontinuidades com diferentes rugosidades e valores de J_r

Na determinação do parâmetro J_r , o preenchimento na descontinuidade tem de ser considerado. Para zonas que contêm material de preenchimento, como minerais argilosos ou rocha esmagada cuja espessura é suficiente para impedir o contacto entre paredes durante a deformação por corte, a rugosidade já não é significativa sendo nesses casos atribuído o valor 1 (categoria "c" na Tabela 2.7).

Se o preenchimento é fino o suficiente para que o contacto entre parede ocorra antes de 10 cm de escorregamento (categoria “b” na Tabela 2.7) o mesmo valor de J_r para descontinuidades sem preenchimento é atribuído (categoria “a” na Tabela 2.7).

No cálculo do índice Q - Barton o valor de J_r a utilizar deve ser o da família de descontinuidades que for mais desfavorável para a estabilidade, do ponto de vista da orientação e da resistência ao corte. Apresenta-se na Tabela 2.7 os pesos atribuídos a este parâmetro relativamente à natureza das superfícies das paredes das descontinuidades e ao seu preenchimento.

Tabela 2.7 - J_r – Índice de rugosidade das diáclases

Descrição		J_r	Notas
a) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades			1. As descrições referentes às alíneas a) e b) referem-se a escalas de amostragem de dimensões pequena e intermédia, respetivamente 2. Somar 1.0 se o espaçamento da família de descontinuidades mais relevante for maior do que 3m. 3. J_r igual a 0.5 podem ser utilizadas para descontinuidades polidas contendo lineações, prevenindo-se o facto de estas devam estar orientadas de acordo com menor resistência.
b) Contacto entre as paredes de rocha antes de 10 cm de escorregamento			
A	Juntas descontínuas	4,0	
B	Descontinuidades rugosas, irregulares, onduladas	3,0	
C	Descontinuidades suaves e onduladas	2,0	
D	Descontinuidades polidas e onduladas	1,5	
E	Descontinuidades rugosas ou irregulares, planas	1,5	
F	Descontinuidades lisas, planas	1,0	
G	Descontinuidades polidas, planas	0,5	
c) Não há contacto entre as paredes de rocha no escorregamento			
H	Zona contendo espessura de minerais argilosos suficiente para impedir o contacto entre as paredes	1,0	
I	Zonas esmagadas, arenosas ou cascalhentas com espessura suficiente para impedir o contacto entre as paredes	1,0	

2.3.3.4. Parâmetro J_a

Assim como a rugosidade, o preenchimento das descontinuidades também é importante para a fricção entre as paredes e consequentemente na avaliação da qualidade do maciço rochoso. A espessura e a força do material de preenchimento são os dois fatores dominantes na avaliação do parâmetro J_a , no caso de existir preenchimento. Na determinação deste parâmetro o preenchimento das descontinuidades está também dividido em três categorias (“a”, “b” e “c” na Tabela 2.8) relacionadas com a espessura, a rugosidade e o grau de contacto das paredes das descontinuidades. Para descontinuidades com superfícies suaves um milímetro de preenchimento pode ser suficiente para impedir o contacto entre paredes; enquanto que para descontinuidades de paredes rugosas ou

onduladas vários milímetros ou até centímetros podem ser necessários. O tipo de mineral e respetivas características do preenchimento das descontinuidades é também decisivo na avaliação do parâmetro J_a , assim como a presença de água que pode provocar expansão em certos minerais nomeadamente nas argilas expansivas [14]

Na Tabela 2.8 apresenta-se os valores atribuídos a este parâmetro no cálculo do índice Q do sistema de Barton. É de referir que o valor a utilizar deve ser o da família de descontinuidades que for mais penalizante do ponto de vista da orientação e da resistência ao corte.

Tabela 2.8 - J_a – Grau de alteração das Descontinuidades

Descrição		J_a	$\Phi(^{\circ})$
a) Contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades			
A	Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis	0,75	---
B	Paredes não alteradas, somente com leve descoloração	1,0	25 - 35
C	Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não brandas	2,0	25 - 30
D	Paredes com partículas siltosas ou areno-argilosas	3,0	20 - 25
E	Paredes com partículas de materiais moles ou de baixo ângulo de atrito, tais como caulinite, mica, gesso, talco, clorite, grafite, etc, e pequenas quantidades de argilas expansivas	4,0	8 - 16
b) Contacto entre paredes de rocha das descontinuidades antes de 10 cm de escorregamento			
F	Paredes com partículas de areia e rocha desintegradas	4,0	25 - 30
G	Descontinuidades com preenchimento argiloso sobreconsolidado (contínuo, mas com espessura <5 mm)	6,0	16 - 24
H	Descontinuidades com preenchimento argiloso subconsolidado (contínuo, mas com espessura <5 mm)	8,0	12 - 16
I	Descontinuidades com enchimento argiloso expansivo, como por exemplo montmorilonite; o valor de J_a depende da percentagem de partículas de argila expansiva e do acesso da água	8,0 - 12,0	6 - 12
c) Não há contacto entre as paredes de rocha das descontinuidades			
J	Zonas ou bandas com rochas desintegradas ou esmagadas com argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	6,8 ou 8 - 12	6 - 24
K	Zonas ou bandas siltosas ou areno-argilosas, com pequena fração de argila	5,0	---
L	Zonas contínuas de argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	10, 13, 13 - 20	6 - 24

2.3.3.5. Parâmetro J_w

O parâmetro J_w representa as condições hidrogeológicas das descontinuidades, e está relacionado essencialmente com o caudal afluyente à frente de escavação e a sua pressão. A presença de água num determinado maciço rochoso pode provocar o amolecimento dos minerais que preenchem a descontinuidade, levando a uma redução da fricção entre as paredes e, consequentemente, a uma eventual rotura por deslizamento. A pressão da água circundante é também importante na medida que reduz as tensões normais das paredes do maciço provocando menor fricção das superfícies das descontinuidades e consequentemente maior facilidade destas deslizarem [14].

Na Tabela 2.9 apresenta-se os valores atribuídos a este parâmetro na classificação do Q - Barton, relativamente à presença de água nas descontinuidades. Os limites entre caudal médio, elevado ou exceccionalmente elevado não são descritos nesta tabela resultando em incertezas na caracterização deste valor. Salienta-se o carácter subjetivo deste parâmetro a cada observador, e a dificuldade na determinação de um valor que represente, de facto, as condições hidrogeológicas das descontinuidades [15].

Tabela 2.9 - J_w – Índice das condições hidrogeológicas

Descrição		J_w	Pressão da água (Mpa)	Notas
A	Escavações secas ou caudal afluído pequeno, isto é <5 l/min localmente	1,0	< 0,1	Os fatores nos casos C e F são estimados para condições naturais. O parâmetro J_w deverá ser aumentado caso sejam efetuadas drenagens. Os problemas especiais relacionados com a formação de gelo não são considerados
B	Caudal médio ou pressão que ocasionalmente arraste o preenchimento das descontinuidades	0,66	0,1 - 0,25	
C	Caudal elevado ou pressão elevada em rochas competentes sem preenchimento	0,5	0,25 - 1,0	
D	Caudal elevado ou pressão elevada, com considerável arrastamento do preenchimento das descontinuidades	0,3	0,25 - 1,0	
E	Caudal exceccionalmente elevado ou pressão explosiva, decaindo com o tempo	0,2 - 0,1	> 1,0	
F	Caudal exceccionalmente elevado ou pressão contínua, sem decaimento	0,1 - 0,05	> 1,0	

2.3.3.6. Parâmetro SRF

O parâmetro SRF (*Stress Reduction Factor*) caracteriza o estado de tensão no maciço rochoso, em profundidade, ou as tensões de expansibilidade em formações incompetentes de comportamento plástico. A avaliação deste parâmetro é feita, quer a partir de evidências de libertação de tensões (explosões de rocha, etc.), quer a partir da ocorrência de zonas de escorregamento ou de alteração localizada. No geral, este parâmetro descreve a relação entre as tensões e a resistência do maciço rochoso à volta da escavação, sendo um indicador das zonas fracas numa determinada formação rochosa [14].

O valor de SRF pode ser determinado a partir da relação entre a resistência à compressão uniaxial da rocha (σ_c) e a tensão principal (σ_1) ou da relação entre a tensão tangencial máxima (σ_θ) e a resistência à compressão do maciço (σ_c) (ver Tabela 2.10). Durante a fase de planeamento da escavação subterrânea este parâmetro pode ser estimado tendo em conta condições topográficas e geológicas do local e de locais semelhantes.

Na Tabela 2.10 apresenta-se os pesos atribuídos ao SRF na classificação do Q - Barton, estando estes divididos em 4 categorias distintas:

- a) Zonas de fraqueza intersectando a escavação, o que pode causar a descompressão do maciço rochoso durante a sua abertura;
- b) Rocha competente, problemas de tensões na rocha;
- c) Rocha esmagada: plastificação de rochas incompetentes sob a influência de altas pressões de rocha;
- d) Rochas expansivas: atividade química expansiva devida à presença da água.

Tabela 2.10 - SRF – Fator de redução de tensões

Descrição			SRF	Notas	
a) Zonas de fraqueza intersectando as escavações, o que pode causar a descompressão do maciço rochoso durante a abertura destas				<div>Reduzir o índice SRF de 25 a 50% se as zonas de corte influenciarem a escavação sem a atravessarem</div> <div>No caso de maciços rochosos contendo argila, é conveniente obter o índice SRF para as cargas de descompressão. A resistência da matriz rochosa é então pouco significativa, em maciços muito pouco fracturados e sem argila</div>	
A	Zonas de fraqueza frequente, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente; maciço rochoso envolvente muito descomprimido (todas profundidades)	10,0			
B	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades de escavação inferiores a 50 m)	5,0			
C	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades de escavação superiores a 50 m)	2,5			
D	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)	7,5			
E	Zonas individuais de corte em rocha competente, sem argila (profundidades de escavação inferiores a 50 m)	5,0			
F	Zonas individuais de corte em rocha rígida, sem argila (profundidades de escavação superiores a 50 m)	2,5			
G	Juntas abertas, rocha muito fraturada e descomprimida (todas as profundidades)	5,0			
b) Rocha competente, problemas de tensões na rocha				σ_c/σ_1	σ_t/σ_1
H	Tensões baixas, próximo da superfície	2,5	> 200	>13	
I	Tensões médias, condições de tensões favoráveis	1	200 - 10	13 - 0,66	
J	Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade; pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	0,5 - 2,0	10,0 - 5,0	0,66 - 0,33	
K	Explosões moderadas de rochas (rocha maciça)	5,0 - 10,0	5,0 - 2,5	0,33 - 0,16	
L	Explosões intensas de rochas (rocha maciça)	10,0 - 20,0	< 2,5	< 0,16	
c) Rocha esmagada: plastificação de rochas incompetentes sob a influência de altas pressões de rocha					
M	Pressão moderada de rocha esmagada	5,0 - 10,0			
N	Pressão elevada de rocha esmagada	10,0 - 20,0			
d) Rochas expansivas: atividade química expansiva devido à presença de água					
O	Pressão de expansão moderada	5,0 - 10,0			
P	Pressão de expansão elevada	10,0 - 15,0			

2.3.4. CÁLCULO DO ÍNDICE Q

Pela aplicação da expressão (7) calcula-se o índice Q - Barton usando diretamente os valores dos seis parâmetros de base determinados conforme explicado nos itens anteriores (Figura 2.10).

CÁLCULO DE Q-BARTON

$$Q = (RQD/J_n) \times (J_r/J_a) \times (J_w/SRF)$$

$\frac{RQD}{J_n} =$

$\frac{J_r}{J_a} =$

$\frac{J_w}{SRF} =$

$Q =$

Fig. 2.10 - Exemplo de cálculo do índice Q – Barton

O valor do Q - Barton é utilizado para a classificação geomecânica do maciço rochoso que pode ser feita de um modo descritivo, qualitativo, conforme ilustrado na Figura 2.11.

QUALIFICAÇÃO DO MACIÇO PELO SISTEMA Q-BARTON

Valor de Q	DESCRIÇÃO	Valor de Q	DESCRIÇÃO
0,001-0,01	Excepcionalmente ruim	4,0-10	Regular a bom
0,01-0,1	Extremamente ruim	10-40	Bom
0,1-1,0	Muito ruim	40-100	Muito bom
1,0-4,0	Ruim	100-400	Extremamente bom
		400-1000	Excepcionalmente bom

Fig. 2.11 - Qualificação do maciço rochoso com base no índice Q – Barton

Quando em projeto geotécnico são estabelecidas classes de maciço rochoso para efeitos de definição do tratamento geotécnico, os valores do Q - Barton que estabelecem os limites das classes geomecânicas são variáveis. Estes são determinados, em cada projeto geotécnico, em função das características da frente de obra. Na Figura 2.12 apresentam-se os limites dos valores de Q - Barton usados no projeto dos túneis de adução usados neste estudo.

TÚNEIS DE ADUÇÃO	
CLASSES DE ROCHA	
Valor de Q	Classe
$Q > 20$	I
$3 < Q < 20$	II
$0,3 < Q < 3$	III
$0,01 < Q < 0,3$	IV
$Q < 0,01$	V

Fig. 2.12 – Limites das classes geomecânicas utilizados no projeto dos túneis de adução em estudo

No cálculo do valor de Q, devido à incerteza e variabilidade que pode existir na definição dos parâmetros integrantes do sistema, pode ser vantajoso recorrer a histogramas no sentido de visualizar e analisar a variação dos dados. Utilizando o valor máximo e mínimo é possível visualizar as variações e tendências para cada parâmetro, e a partir dos respectivos valores médios calcular um valor de Q - Barton estatisticamente mais representativo do maciço em questão, diminuindo a incerteza relativamente aos valores utilizados na parametrização do sistema de Q - Barton.

2.3.4.1. Parâmetro geotécnicos relacionados com o índice Q - Barton

Na avaliação da qualidade do maciço rochoso em escavações subterrâneas ou cavernas utilizando o sistema do Q - Barton, dois fatores são decisivos na decisão do tipo de suporte a utilizar, a geometria da secção escavada e o fator de segurança exigido. De forma a integrar estes dois elementos no sistema, Barton et al. (1974) [1] definiram um parâmetro adicional a que chamaram de Dimensão Equivalente para a Escavação (d_e) que é obtido dividindo o vão, diâmetro ou a altura da secção escavada, por um índice denominado ESR (*Excavation Support Ratio*) como se demonstra na expressão (12).

$$d_e = \frac{\text{vão, diâmetro, altura(m)}}{ESR} \quad (12)$$

O índice ESR foi integrado neste sistema de classificação de forma a incluir o grau de segurança exigido de acordo com o tipo e finalidade da obra, relacionando-o com o sistema de suporte necessário para manter a estabilidade. A valores reduzidos de ESR estão associados níveis de segurança altos, enquanto para valores de ESR altos um nível medio ou baixo de segurança é aceitável [14], [20].

Na Tabela 2.11 apresenta-se os valores atribuídos ao índice ESR relativamente ao tipo e finalidade da obra.

Tabela 2.11 -ESR-índice de segurança (Barton et al. 1974)

Classe	Tipo de escavação	ESR
A	Cavidades mineiras temporárias	3,0 – 5,0
B	Poços verticais de secção circular	2,5
	Poços verticais de secção quadrada ou retangular	2,0
C	Cavidades mineiras definitivas, túneis de aproveitamentos hidráulicos (exceto túneis sob pressão), túneis piloto, túneis de desvio, escavações superiores a grandes cavidades	1,6
D	Cavernas de armazenagem, estações de tratamento de águas, pequenos túneis rodo-ferroviários, chaminés de equilíbrio, túneis de acesso	1,3
E	Centrais subterrâneas, túneis rodo-ferroviários de grande dimensão, abrigos de defesa, bocas de entrada, intersecções	1,0
F	Centrais nucleares subterrâneas, estações de caminhos-de-ferro, fábricas	0,8

No caso de túneis escavados com recurso a tuneladora, estes valores sofrem algumas alterações, devendo ser utilizados os da Tabela 2.12 [21].

Tabela 2.12- ESR-Valores de índice de segurança a considerar para túneis TBM

Tipo de escavação	ESR	Notas
Túneis piloto	2	*Deve utilizar-se o valor 0,5 no caso de túneis longos destinados a comboios de alta velocidade e de tráfego automóvel.
Túneis para água de esgotos	1,5	
Túneis de tráfego	0,5* a 1,0	

Conjugando os valores de Q de Barton e da dimensão equivalente no ábaco da Figura 2.6, é possível determinar a categoria do suporte definitivo requerido (Grimstad e Barton, 1993) [11] e estimar a quantidade e tipo de suporte necessários para estabilizar o maciço rochoso.

A partir deste sistema é ainda possível obter outras informações relevantes, nomeadamente o módulo de elasticidade do maciço rochoso (E). Este pode ser correlacionado com o índice Q - Barton, segundo as expressões abaixo [2]:

$$\text{Barton et al, 1980} \quad E_M \text{ (GPa)} = 25 \cdot \text{LOG}(Q) ; Q > 1 \quad (13)$$

$$\text{Barton e Quadros, 2002} \quad E_M \text{ (GPa)} = 10 \cdot Q^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

Os deslocamentos de convergência do túnel podem também ser estimados a partir do valor de Q de Barton, estes vão ser dependentes do vão, da altura do túnel (ou diâmetro em caso de secção circular), das tensões verticais (σ_v) e horizontais (σ_h), e da resistência à compressão uniaxial (σ_c). Apresenta-se nas expressões (15) e (16) as relações propostas por Barton (1998) [22] que permitem estimar o valor do deslocamento horizontal e vertical de convergência do túnel [18].

$$\Delta_v \approx \frac{vão}{100 \cdot Q} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_v}{\sigma_c}} \quad (15)$$

$$\Delta_h \approx \frac{altura}{100 \cdot Q} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_h}{\sigma_c}} \quad (16)$$

O comprimento L das pregagens e ancoragens pode ser estimado através da largura da escavação B, do valor de ESR e da altura da escavação H em metros, recorrendo às expressões propostas por Barton (1974) [1] e apresentadas na Tabela 2.13.

Tabela 2.13- Estimativa do comprimento de pregagens e ancoragens

	Pregagens	Ancoragens
Abóbada	$L(m) = 2 + \frac{0,15 \cdot B}{ESR} \quad (17)$	$L(m) = \frac{0,40 \cdot B}{ESR} \quad (19)$
Paredes	$L(m) = 2 + \frac{0,15 \cdot H}{ESR} \quad (18)$	$L(m) = \frac{0,35 \cdot H}{ESR} \quad (20)$

3

DESCRIÇÃO GERAL DO CIRCUITO HIDRÁULICO

3.1. INTRODUÇÃO

O circuito hidráulico que serviu como base do presente estudo contempla seis túneis de adução (TA) paralelos, referenciados como TA01, TA02, TA03, TA04, TA05 e TA06 com um comprimento entre 1,872 km para o TA06 e de 2,004 Km para o TA01. O desmonte rochoso de cada túnel foi realizado de acordo com a metodologia NATM definida em projeto, a partir de 2 túneis de ataque, um localizado a jusante e outro a montante divididos, cada um, em duas frentes de desmonte.

Neste capítulo serão caracterizadas as condições geológicas e geotécnicas do local onde se insere a obra e vão ser descritas as características geológico-geotécnicas do circuito hidráulico, de forma particular para cada um dos seis túneis de adução.

3.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA DO CIRCUITO HIDRÁULICO

A caracterização geológico-geotécnica dos túneis de adução está estruturada em três subcapítulos que abordam, de uma forma global, a geologia local do aproveitamento hidráulico e, para cada túnel, as características do maciço rochoso e as discontinuidades interpretadas como falhas.

3.2.1. GEOLOGIA LOCAL

A geologia do local de implantação do aproveitamento hidráulico estudado é formada por um conjunto de rochas metassedimentares com aproximadamente 100 metros de espessura depositada em contato sub-horizontal formado por uma discordância erosiva sobre um soco gnáissico de idade Arcaica (3000 Ma a 3500 Ma). O conjunto metassedimentar é composto por metarenitos, metassiltitos e brechas conglomeráticas. Na região da barragem, em ambas as margens do rio, há escarpas de rochas metassedimentares formando paredões subverticais de até 100 metros de altura. No sopé das escarpas ocorrem depósitos de cascalheiras e depósitos coluvionares de espessuras decamétricas. Na região da barragem, poucos metros acima do leito do rio, aproximadamente na elevação 750 metros, afloram os gnaisses do soco Arcaico. O contato entre o gnaiss e o conjunto metassedimentar sobrejacente sobe gradualmente em direção à área da central principal, onde aflora aproximadamente na elevação 800 metros. Desta forma, todo complexo de túneis e caverna central principal está projetado integralmente no maciço gnáissico.

No anexo A na figura A1 apresenta-se uma seção geológica dos túneis de adução.

3.2.2. CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO

O maciço rochoso gnáissico foi caracterizado em função da variação dos parâmetros de alteração (A), coerência (C) e fracturação (F), e organizado por diferente túnel de adução nos subcapítulos seguintes. No anexo B na figura B1 a B3 apresentam-se respetivamente as tabelas utilizadas para a determinação dos valores de alteração, coerência e fracturação.

As características geomecânicas do maciço rochoso dos seis túneis de adução sistematizam-se no anexo A na figura A2, onde se registam as características acima mencionadas, por intervalos que correspondem a cada avanço do desmonte. A informação utilizada na construção dos zonamentos foi retirada dos levantamentos geológico-geotécnicos de escavação dos túneis, de acordo com os seguintes critérios:

- Foi adotado o valor mais penalizante no caso de haver mais que um dado para o mesmo trecho;
- No caso de não haver informação da abóboda, os parâmetros de alteração (A) e fracturação (F) foram calculados por correlação com os valores dos parâmetros de cálculo do Q - Barton;
- O parâmetro coerência/consistência (C), nas situações descritas e quando plausível, foi calculado por interpolação.

As litologias descritas nos subcapítulos seguintes para cada um dos TA podem apresentar, do ponto de vista geomecânico, características inferiores às descritas pelos parâmetros de alteração / fracturação / consistência devido à presença, localizada, de zonas de falha.

3.2.2.1. Caracterização do maciço rochoso do túnel de adução 1

A escavação de todos os túneis de adução foi realizada na mesma litologia. Foi identificado o complexo gnáissico (GN), de idade Arcaica, constituído por gnaisses com fácies anfibolítica, que por vezes se apresentam dobrados com os leitos mais anfibolíticos boudinados. Estas litologias foram transpostas por uma intensa deformação que gerou uma foliação metamórfica (Sn) e que imprimiu ao maciço rochoso um bandado gnáissico com atitude subvertical, orientada segundo NW-SE. Posteriormente a esta primeira fase de metamorfismo, ocorre um episódio de retrometamorfismo, em fácies de xistos-verdes que é caracterizado pela formação de epídoto e clorite. Neste maciço rochoso, esta fácies mais tardia caracteriza-se pela presença de veios de epídoto que podem atingir possanças métricas. A calcite surge tardiamente, por precipitação do carbonato de cálcio presente na água que circula nas fraturas existentes, havendo preenchimentos de calcite com possança centimétrica.

A Figura 3.1 ilustra o tipo de maciço rochoso ocorrente nas frentes de escavação dos túneis de adução.

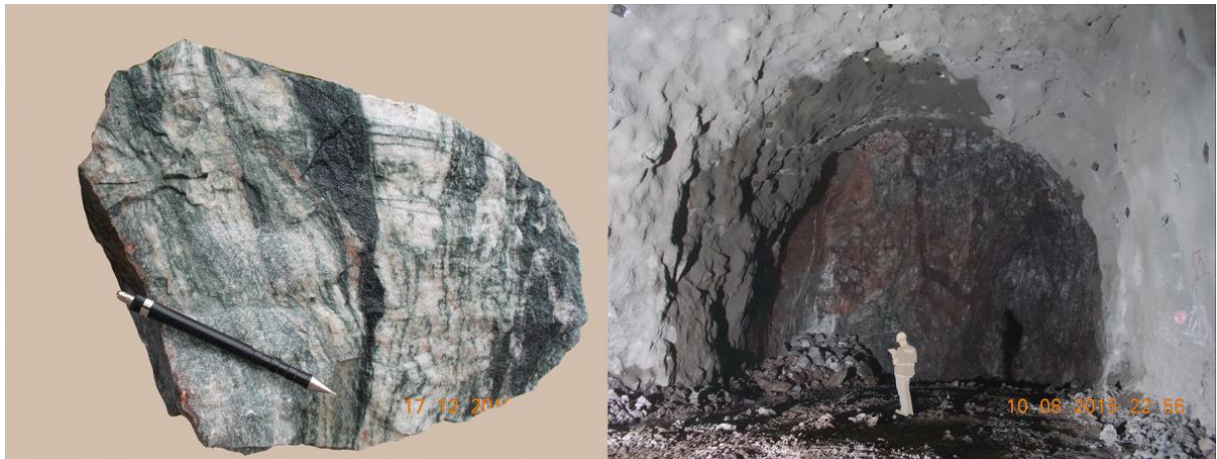


Fig. 3.1 - À esquerda, amostra de gnaiss anfibolítico evidenciando o bandado gnáissico típico, com bandas mais feldspáticas, de cor mais claras, com dobramentos e leitos anfibolíticos, mais escuros, exibindo boudinagem; transversalmente a esta estruturação são visíveis pequenos veios esverdeados, mais tardios, com o epídoto associado ao retrometamorfismo. À direita, frente de escavação num dos túneis de adução, observando-se no lado esquerdo uma zona mais oxidada correspondente a uma zona de falha a desenvolver-se perpendicularmente ao eixo do túnel.

Na Figura 3.2 é apresentado de forma esquemática a síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração (A1-A5), coerência/consistência (C1-C5) e fracturação (F1-F5) para o túnel de adução 1.

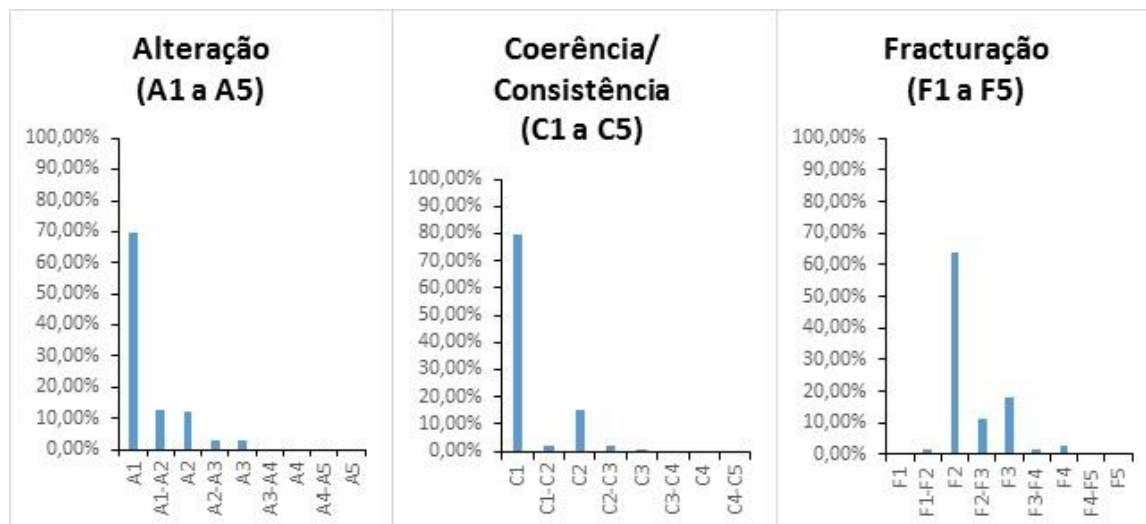


Fig. 3.2 - Síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração, consistência/coerência e fracturação do maciço rochoso do TA01

Na análise destes dados concluiu-se que o maciço se apresentava maioritariamente A1 (70%) C1 (80%) e F2 (64%), destacando também, a presença de maciço A1-A2 e A2 (12%), C2 (15%) e F3 (18%). Este maciço foi assim definido como muito consistente(C1) e pouco a medianamente fraturado(F2 a F3), apresentando-se na sua generalidade muito coerente.

3.2.2.2. Caracterização do maciço rochoso do túnel de adução 2

Na escavação do túnel de adução TA02 foi identificado o complexo gnáissico (GN) em tudo idêntico à litologia de todos os outros túneis de adução: gnaisses com fácies anfibolítica, dobrados e boudinados com Sn orientada NW-SE subvertical, retrometamorfisados em fácies de xistos-verdes, com preenchimentos de epidoto e calcite e filões de feldspato potássico de cor rosada.

Na Figura 3.3 é apresentado de forma esquemática a síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração (A1-A5), coerência/consistência (C1-C5) e fracturação (F1-F5) para o túnel de adução 2.

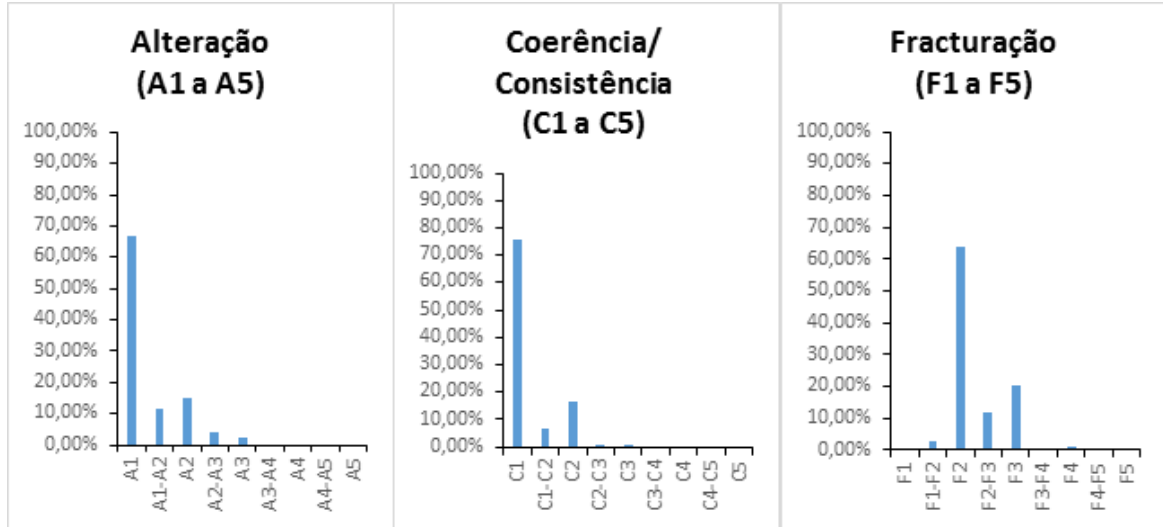


Fig. 3.3 - Síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração, consistência/coerência e fracturação do maciço rochoso do TA02

Analisando os dados apresentados na Figura 3.3 depreende-se que o maciço gnaissico se apresenta maioritariamente A1 (67%), C1 (76%) e F2 (64%), destacando a presença de maciço A2 (15%), C2 (17%) e F3 (12%). De forma residual ocorrem outros parâmetros geomecânicos. Este maciço, de características semelhantes ao tunel de adução 1 foi assim caracterizado como geralmente são (A1), muito consistente (C1) e pouco a medianamente fracturado (F2 a F3).

3.2.2.3. Caracterização do maciço rochoso do túnel de adução 3

Na escavação do túnel de adução TA03 foi identificado o complexo gnáissico (GN) em tudo idêntico à litologia de todos os outros túneis de adução: gnaisses com fácies anfibolítica, dobrados e boudinados, com Sn orientada NW-SE subvertical, retrometamorfisados em fácies de xistos-verdes, com preenchimentos de epídoto e calcite e filões de feldspato potássico de cor rosada.

Na Figura 3.4 é apresentado de forma esquemática a síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração (A1-A5), coerência/consistência (C1-C5) e fracturação (F1-F5) para o túnel de adução 3.

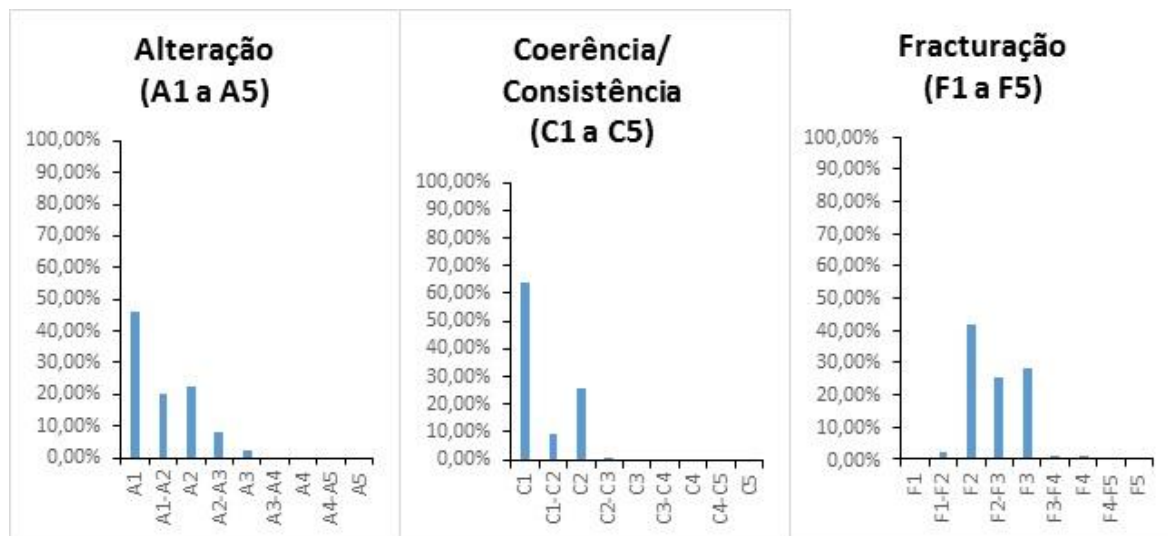


Fig. 3.4 - Síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração, consistência/coerência e fracturação do maciço rochoso do TA03

Analisando os dados apresentados na Figura 3.4 concluiu-se que o maciço apresenta-se sobretudo como A1 (46%); C1 (64%) e F2 (42%), destacando a presença de maciço A2 (23%), C2 (26%) e F2-F3 (26%) e F3 (28%) e, de forma residual, a ocorrência de outros parâmetros geomecânicos. O que leva a definir esta maciço rochoso como uma maciço em geral não alterado ou muito pouco alterado (A1-A2), muito consistente (C1) e pouco a medianamente fracturado (F2 a F3).

3.2.2.4. Caracterização do maciço rochoso do túnel de adução 4

Na escavação do túnel de adução TA04 foi identificado o complexo gnáissico (GN) em tudo idêntico à litologia de todos os outros túneis de adução: gnaisses com fácies anfibolítica, dobrados e boudinados, com Sn orientada NW-SE subvertical, retrometamorfisados em fácies de xistos-verdes, com preenchimentos de epidoto e calcite e filões de feldspato potássico de cor rosada.

Na Figura 3.5 é apresentado de forma esquemática a síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração (A1-A5), coerência/consistência (C1-C5) e fracturação (F1-F5) para o túnel de adução 4.

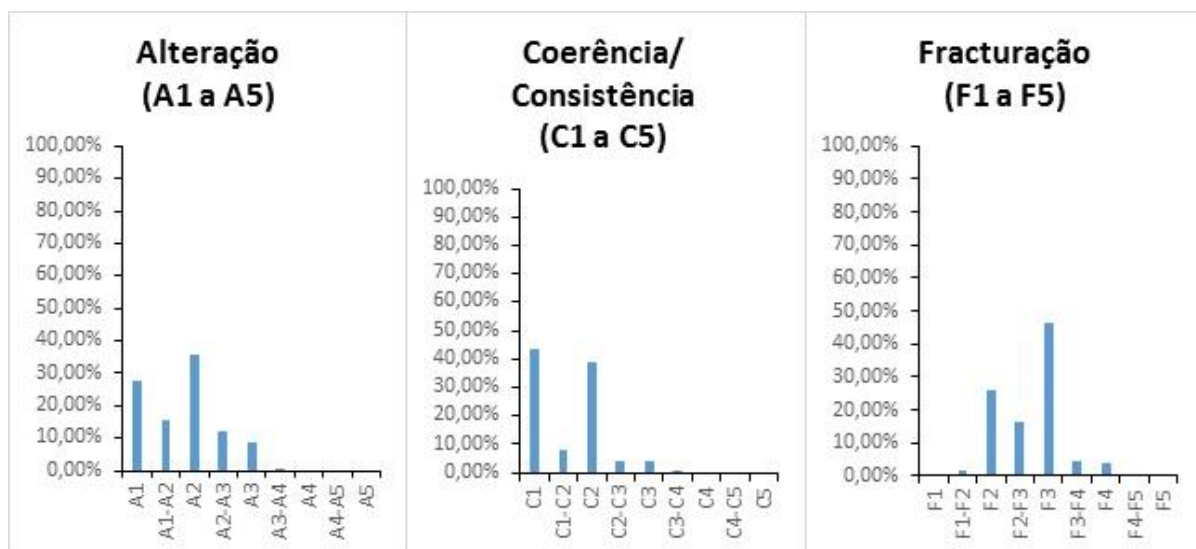


Fig. 3.5 - Síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração, consistência/coerência e fracturação do maciço rochoso do TA04

Analisando os dados apresentados na Figura 3.5 depreende-se que o maciço se apresenta sobretudo A2 (36%), C1 (44%) e F3 (47%). Secundariamente ocorre maciço A1 (27%), C2 (39%) e F2 (26%) e, de forma residual, verifica-se a presença de maciço rochoso com outros parâmetros geomecânicos. Como é possível aferir pela análise dessa figura, o maciço rochoso do túnel de adução 4 apresenta-se geralmente pouco alterado (A2), muito consistente (C1) e medianamente fracturado (F3). Esta classificação geomecânica em muito é influenciada pelas falhas presentes ao longo do maciço.

3.2.2.5. Caracterização do maciço rochoso do túnel de adução 5

Na escavação do túnel de adução TA05 foi identificado o complexo gnáissico (GN) em tudo idêntico à litologia de todos os outros túneis de adução: gnaisses com fácies anfibolítica, dobrados e boudinados, com S_n orientada NW-SE subvertical, retrometamorfisados em fácies de xistos-verdes, com preenchimentos de epidoto e calcite e filões de feldspato potássico de cor rosada.

Na Figura 3.6 é de forma esquemática apresentada a síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração (A1-A5), coerência/consistência (C1-C5) e fracturação (F1-F5) para o túnel de adução 5.

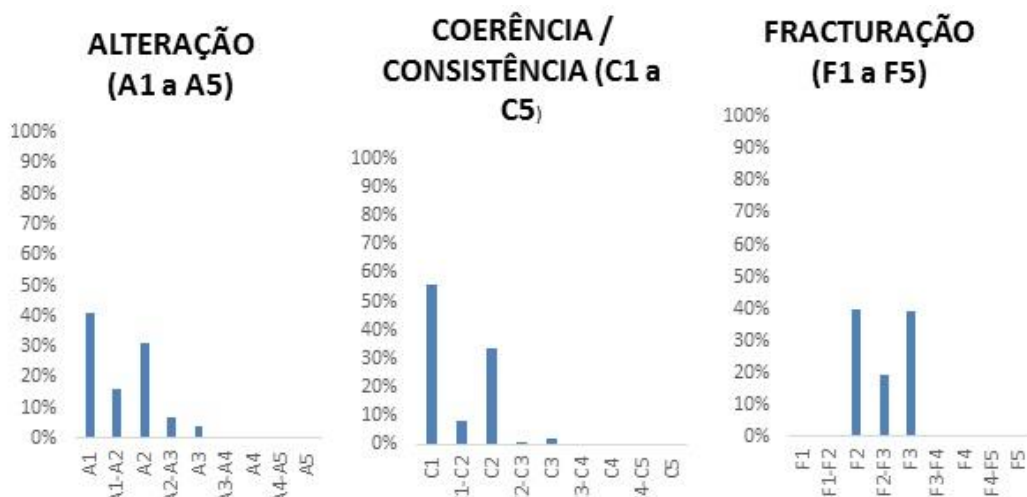


Fig. 3.6 - Síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração, consistência/coerência e fracturação do maciço rochoso do TA05

Na projeção estatística das características geomecânicas apresentadas na Figura 3.6, verifica-se que globalmente o maciço apresenta-se são (A1), muito coerente (C1) e pouco fraturado (F2), sendo este classificado como um maciço de Classe II. Zonas em que o maciço apresentou características geomecânicas inferiores (pouco alterado, consistente e medianamente fraturado), este foi classificado como um maciço de Classe III, fundamentalmente, devido à presença de descontinuidades do tipo falhas.

3.2.2.6. Caracterização do maciço rochoso do túnel de adução 6

Na escavação do túnel de adução TA06 foi identificado o complexo gnáissico (GN) em tudo idêntico à litologia de todos os outros túneis de adução: gnaisses com fácies anfibolítica, dobrados e boudinados, com S_n orientada NW-SE subvertical, retrometamorfisados em fácies de xistos-verdes, com preenchimentos de epidoto e calcite e filões de feldspato potássico de cor rosada.

Na Figura 3.7 é de forma esquemática apresentada a síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração (A1-A5), coerência/consistência (C1-C5) e fracturação (F1-F5) para o túnel de adução 6.

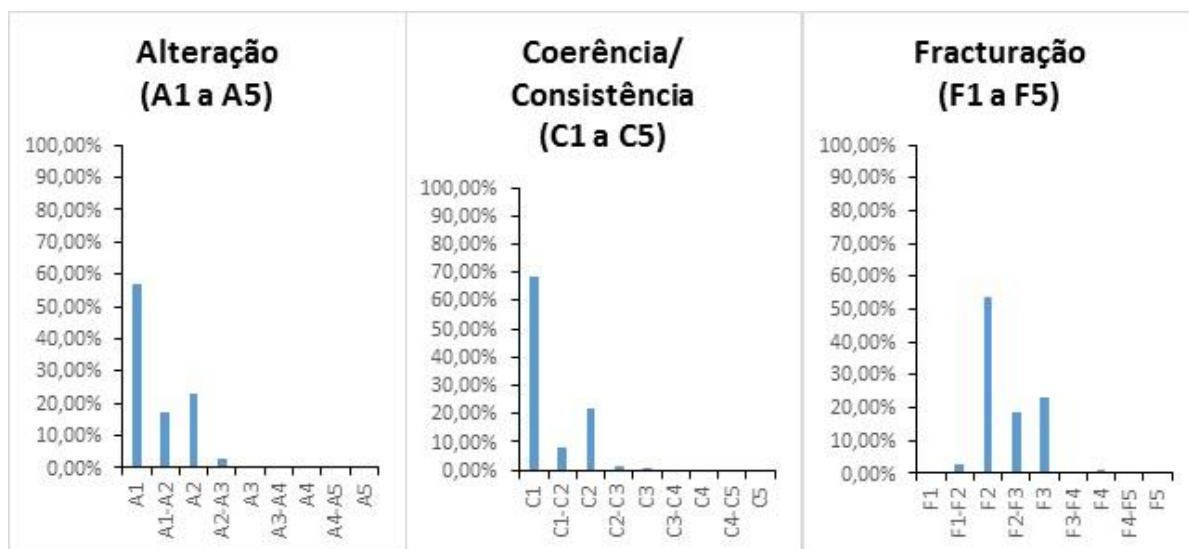


Fig. 3.7 - Síntese estatística dos parâmetros geomecânicos alteração, consistência/coerência e fracturação do maciço rochoso do TA06

Na análise destes dados concluiu-se que o maciço se apresentava maioritariamente entre dois parâmetros de alteração, coerência e fracturação: A1 (57%) e A2 (23%); C1 (69%) e C2 (22%), F2 (54%) e F3 (23%)., evidenciando-se também a presença de maciço A1-A2 (17%), C1-C2 (8%) e F2-F3 (19%) e de forma muito residual a ocorrência de outros parâmetros geomecânicos. Este maciço rochoso apresenta-se geralmente são a pouco alterado (A1 a A2), muito consistente a consistente (C1 a C2) e pouco a medianamente fracturado (F2 a F3).

3.2.2.7. Análise Comparativa dos seis Túneis de adução

Numa análise comparativa para todos os túneis (Figura 3.8), surge como evidente que o TA04 é aquele que apresenta piores características geomecânicas: é o túnel com maior alteração A2 e A3 (rocha pouco alterada a medianamente alterada), com menor consistência C2 e C3 (consistente a medianamente consistente) e fracturação F3 e F4 (medianamente fracturado a muito fracturado). Os restantes túneis caracterizam-se por melhores condições de alteração A1 (rocha sã), consistência C1 (muito consistente) e fracturação F2 (pouco fracturado).

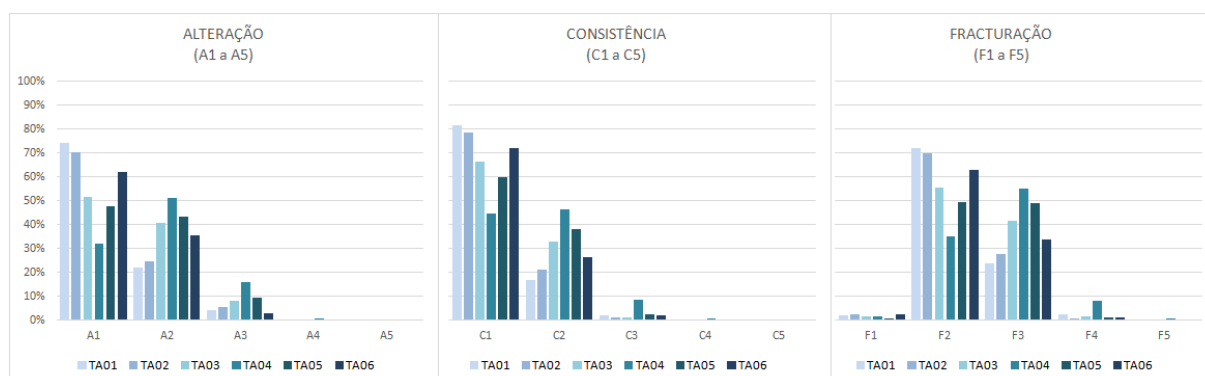


Fig. 3.8 - Síntese comparativa das características de alteração, consistência e fracturação dos seis túneis de adução.

3.2.3. DESCONTINUIDADES INTERPRETADAS COMO FALHA

Para além das características geomecânicas do maciço rochoso em termos de alteração, consistência e fracturação, das famílias de descontinuidades interpretadas como fraturas ou diáclases (tratadas no ponto 3.3.), um outro fator que se revela fundamental para o comportamento do maciço rochoso durante a escavação é a ocorrência de descontinuidades do tipo falha.

As descontinuidades interpretadas como falhas foram analisadas e classificadas em campo segundo três tipos quanto à sua importância:

- Tipo I – Zonas de falha caracterizadas apenas por uma interferência no padrão de fracturação (aumento da densidade e desenvolvimento de sistemas conjugados de segunda ordem);
- Tipo II – Zonas de falha com menor expressão, apenas com algumas das manifestações de falha – padrão de fracturação e/ou esmagamento e/ou argila e/ou água e/ou estrias;
- Tipo III – Zonas de falha caracterizadas pela ocorrência das características mais frequentes associadas a este tipo de estrutura: aumento da fracturação, esmagamento, brechificação, argilificação da caixa de falha, circulação de água e estrias de movimentação e preenchimento de quartzo.

Para as falhas do tipo I foi feito um registo que permite visualizar o padrão de distribuição ao longo do circuito hidráulico dos túneis de adução. As falhas tipo II e III foram objeto de uma análise geológico-geotécnica mais pormenorizada que conduziu à definição de zonas de falha (ZF), selecionando-se aquelas que foram consideradas como as zonas mais críticas em cada túnel.

Na Figura A3 do anexo A apresenta-se de forma esquemática todas as falhas tipo I, II e III cartografadas nos seis túneis de adução cujas características serão estatisticamente analisadas nos subcapítulos seguintes, e na Figura A4 as quinze zonas de falha definidas nos seis túneis de adução conforme se demonstra na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Zonas de falha (ZF) dos 6 túneis de adução

TÚNEL	ZONA DE FALHA	PROGRESSIVAS	EXTENSÃO
TA01	-	-	-
TA02	-	-	-
TA03	ZF-3-350	2+95 a 4+55	160 m
	ZF-3-820	7+90 a 8+62	72 m
	ZF-3-885	8+78 a 9+07	29 m
	ZF-3-1165	11+47.60 a 11+85	37.4 m
TA04	ZF-4-760	6+60 a 7+76	116 m
	ZF-4-1435	12+30 a 13+85	155 m
	ZF-4-1740	13+85 a 17+90	405 m
TA05	ZF-5-840	8+28 a 8+55	33 m
	ZF-5-880	8+55 a 9+28	73 m
	ZF-5-945	9+28 a 9+64	36 m
	ZF-5-1284	12+75 a 12+90	15 m
	ZF-5-1440	14+15 a 14+26	11 m
TA06	ZF-6-420	4+03 a 4+20	17
	ZF-6-1090	10+27 a 11+45.10	118.1 m
	ZF-6-1235	11+94.50 a 12+74.50	80 m

As características das zonas de falha e das discontinuidades interpretadas como fraturas foram tratadas de modo estatístico de forma a evidenciar os parâmetros mais frequentes e as correspondentes amplitudes de variação.

Na caracterização geomecânica das zonas falhas utilizaram-se cinco parâmetros: regularidade (Irregular (IR), Ondulada (ON), Planar (PL)), rugosidade (Rugosa (RG), Lisa (LI), Espelhada (ES)), tipo de contacto entre as paredes das discontinuidades (P0 P1, P2, P3), abertura (E1, E2, E3, E4) e alteração das paredes (a1, a2, a3, a4 e ox).

As características de espaçamento (f1, f2, f3, f4, f5) e continuidade (L1, L2, L3, L4, L5) não foram tratadas estatisticamente uma vez que a sua avaliação é feita com base na expressão cartográfica.

Nas figuras B4 a B9 presentes no anexo B, apresentam-se, respetivamente, as tabelas utilizadas para a determinação dos valores de regularidade / rugosidade, tipo de contacto, abertura, alteração da parede, espaçamento e continuidade

3.2.3.1. Descontinuidades interpretadas como zonas de falha no túnel de adução 1

Na cartografia geológico-geotécnica para o túnel de adução 1 foram identificadas quarenta e uma zonas de falha cuja análise estatística das suas características se encontram sintetizadas em forma de histogramas na Figura 3.9.

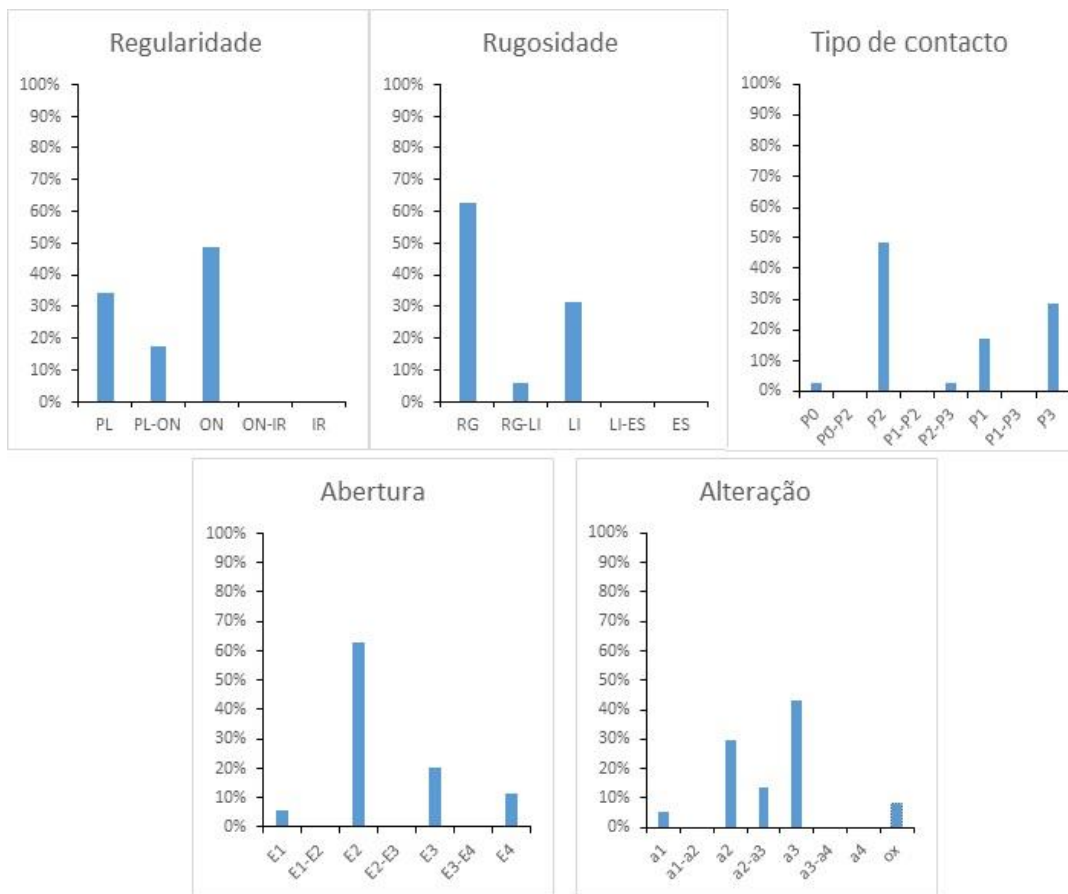


Fig. 3.9 - Análise estatística das características das zonas de falha do TA01 quanto à regularidade, rugosidade, tipo de contacto, abertura e alteração

A partir dos histogramas acima concluiu-se que há alguma heterogeneidade nas características observadas nas zonas de falha. No entanto, existe uma predominância das falhas em serem onduladas (ON), rugosas (RG), com contacto rocha-rocha com fração granular entre as paredes (P2), abertura entre 1 e 5 mm (E2), e alteração moderada das paredes das falhas (a3). No túnel TA01 não foram identificadas zonas de falha do tipo I e tipo II suscetíveis de formar zonas de maior fraqueza estrutural do maciço rochoso e por isso não foram tratadas ao nível de zonas de falha (ZF).

3.2.3.2 Descontinuidades interpretadas como zonas de falha no túnel de adução 2

Na cartografia geológico-geotécnica para o túnel de adução 2 foram identificadas quarenta e uma falhas cuja análise estatística das suas características se encontram sintetizadas em forma de histogramas na Figura 3.10.

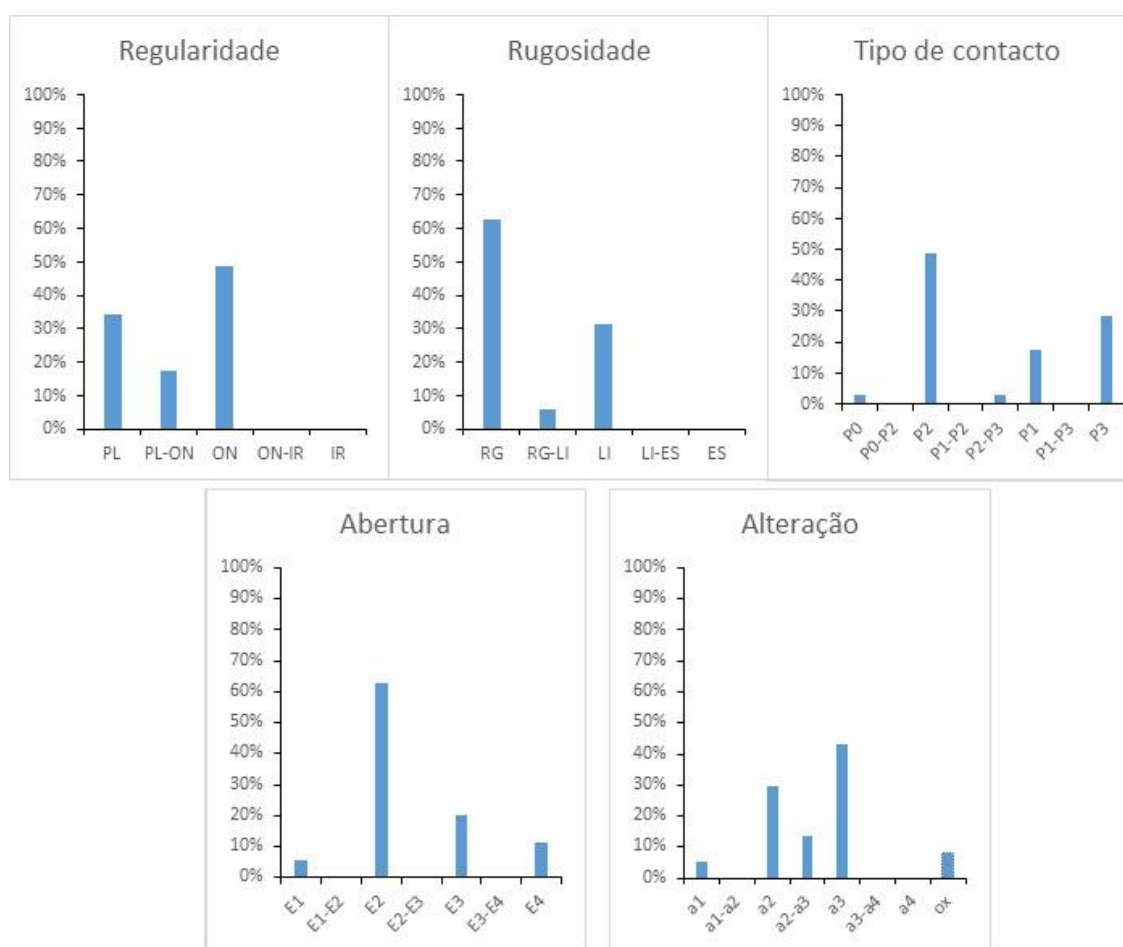


Fig. 3.10 - Análise estatística das características das zonas de falha do TA02 quanto à regularidade, rugosidade, tipo de contacto, abertura e alteração

Nos histogramas acima é possível depreender que assim como o túnel de adução 1, ocorre alguma heterogeneidade nas características observadas nas falhas. No entanto, existe uma predominância das falhas serem onduladas a planas (ON/PL), rugosas a lisas (RG/LI), com contacto rocha-rocha com fração granular entre as paredes (P2) mas também com preenchimento argiloso (P3) e residualmente

areno-siltoso (P1), abertura entre 1 e 5 mm (E2), e alteração moderada (a3) a ligeira (a2) das paredes das falhas.

3.2.3.3. Descontinuidades interpretadas como zonas de falha no túnel de adução 3

Na cartografia geológico-geotécnica para o túnel de adução 3 foram identificadas trinta e seis zonas de falha cuja análise estatística das suas características se encontram sintetizadas em forma de histogramas na Figura 3.11.

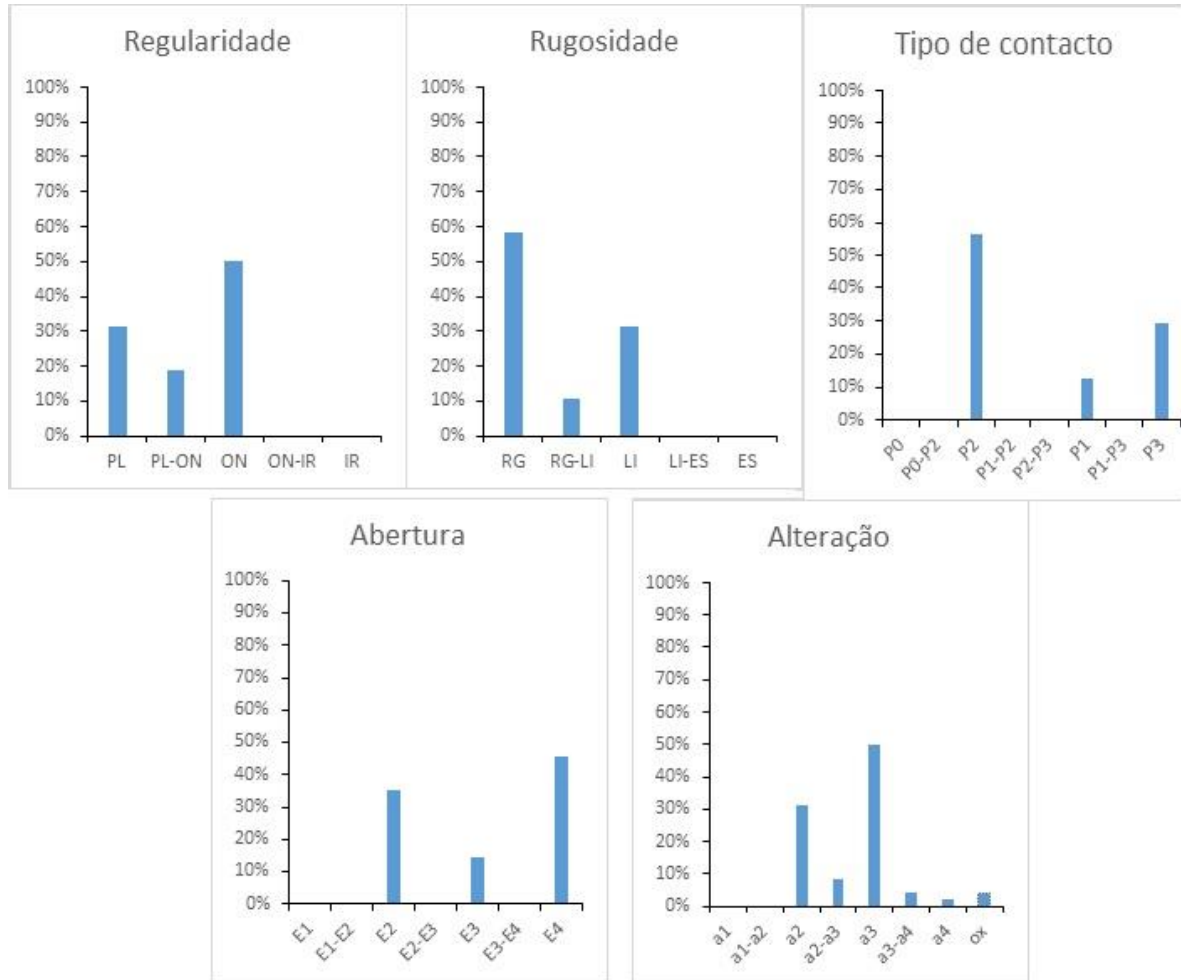


Fig. 3.11 - Análise estatística das características das zonas de falha do TA03 quanto à regularidade, rugosidade, tipo de contacto, abertura e alteração

Pela observação dos dados estatísticos relativos às características observadas nas falhas, nota-se alguma heterogeneidade e variação dos diferentes parâmetros. Contudo, existe uma predominância das falhas do TA03 em serem onduladas a planas (ON/PL), rugosas a lisas (RG/LI), com contacto rocha-rocha com fracção granular entre as paredes (P2), mas também com preenchimento argiloso (P3) e residualmente com preenchimento areno-siltoso (P1), aberturas entre 1 a 5mm (E2) até superior a 10 mm (E4) e alteração leve a moderada das paredes das falhas (a2 a a3).

3.2.3.4. Descontinuidades interpretadas como zonas de falha no túnel de adução 4

Na cartografia geológico-geotécnica para o túnel de adução 4 foram identificadas trinta e uma zonas de falha cuja análise estatística das suas características se encontram sintetizadas em forma de histogramas na Figura 3.12.

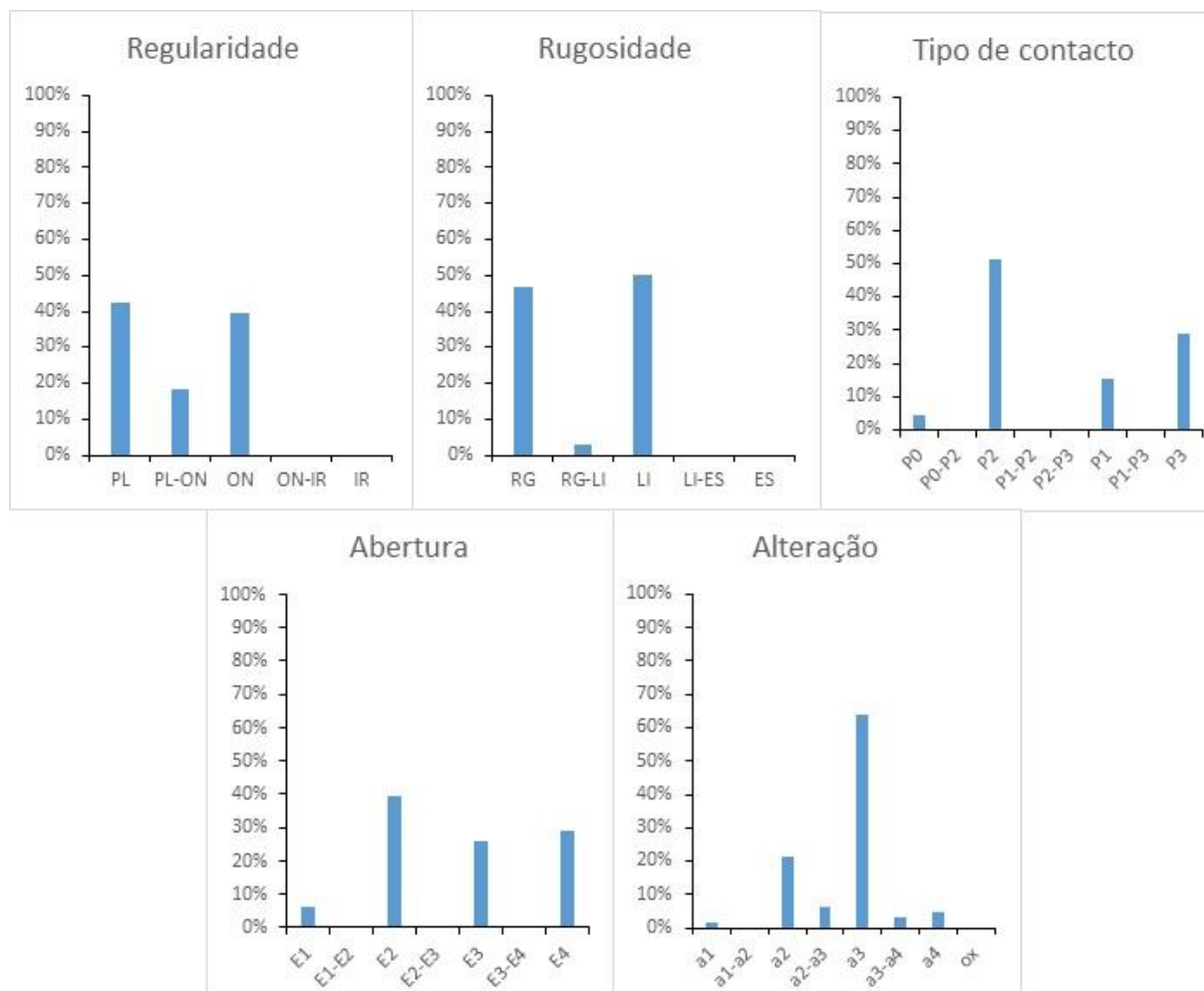


Fig. 3.12 - Análise estatística das características das zonas de falha do TA04 quanto à regularidade, rugosidade, tipo de contacto, abertura e alteração

A heterogeneidade nas características observadas nos planos de falha mantém-se para o túnel de adução 4, no entanto existe uma predominância estatística de falhas planas a onduladas (PL/ON), rugosas a lisas (RG/LI), com contacto rocha-rocha e fração granular entre as paredes (P2), mas também com preenchimento argiloso (P3) e areno-siltoso (P1), com abertura superior a 1 mm (de E2 até E4) e alteração moderada das paredes das falhas (a3).

3.2.3.5. Descontinuidades interpretadas como zonas de falha no túnel de adução 5

Na cartografia geológico-geotécnica para o túnel de adução 5 foram identificadas sessenta e oito zonas de falha cuja análise estatística das suas características se encontram sintetizadas em forma de histogramas na Figura 3.13.

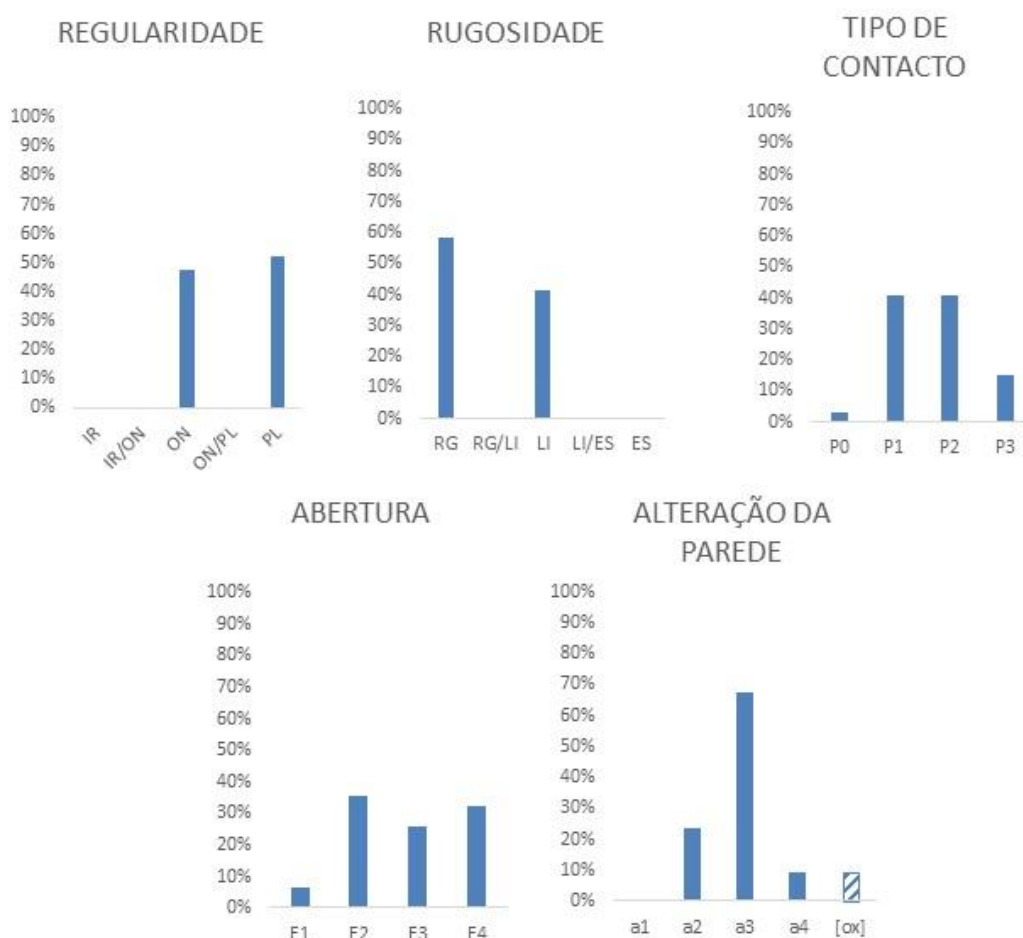


Fig. 3.13 - Análise estatística das características das zonas de falha do TA05 quanto à regularidade, rugosidade, tipo de contacto, abertura e alteração

A partir da análise das características das falhas cartografadas verificou-se que para o túnel de adução 5 existe a tendência das falhas serem do tipo, PL-ON, RG-LI, P1-2, E2-4, a3, ou seja, são falhas, planas a onduladas, rugosas a lisas, com contato entre as paredes do tipo rocha-rocha com presença de fracção granular entre as paredes, abertas a muito abertas e de paredes moderadamente alteradas.

3.2.3.6. Descontinuidades interpretadas como zonas de falha no túnel de adução 6

Na cartografia geológico-geotécnica para o túnel de adução 6 foram identificadas quarenta e uma zonas de falha cuja análise estatística das suas características se encontram sintetizadas em forma de histogramas na Figura 3.14.

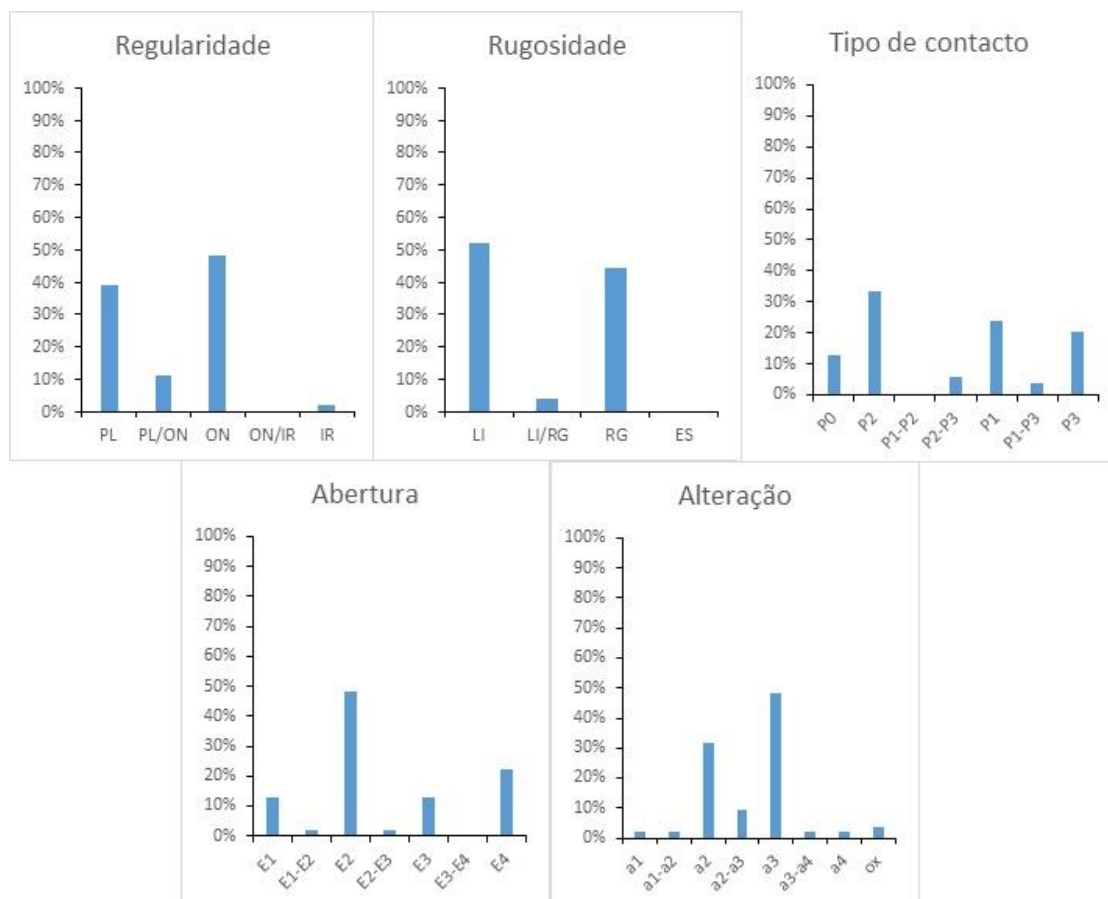


Fig. 3.14 - Análise estatística das características das zonas de falha do TA06 quanto à regularidade, rugosidade, tipo de contacto, abertura e alteração

Tal como foi observado nos outros 5 túneis de adução não existe homogeneidade nas características observadas. No entanto, no TA06 existe uma predominância das falhas serem onduladas, lisas, com fracção granular entre as paredes e/ou presença de argila, abertura entre 1 e 5 mm, por vezes mais que 10 mm e alteração moderada das paredes das falhas.

3.3. FAMÍLIAS DE DESCONTINUIDADES DE PROJETO

Para o estabelecimento das famílias de descontinuidades a considerar no projeto de estabilidade foram tratadas as informações recolhidas na cartografia geológico-geotécnica da escavação do túnel de adução 3, entre as progressivas pk1+825 e pk 1+891. As atitudes das descontinuidades foram tratadas no programa Dips 6.0 e foi gerado um estereograma com as principais famílias. Esse estereograma é mostrado na Figura 3.15, onde estão representadas as famílias consideradas em projeto.

Foi escolhido este túnel e esta região para as análises de estabilidade porque os túneis de adução 3 e 4 são os túneis em que as poropressões são maiores em caso de esvaziamento – porque são os túneis internos –, e porque nas proximidades da caverna – logo a montante do trecho blindado –, a carga hidráulica estática atinge o maior valor.

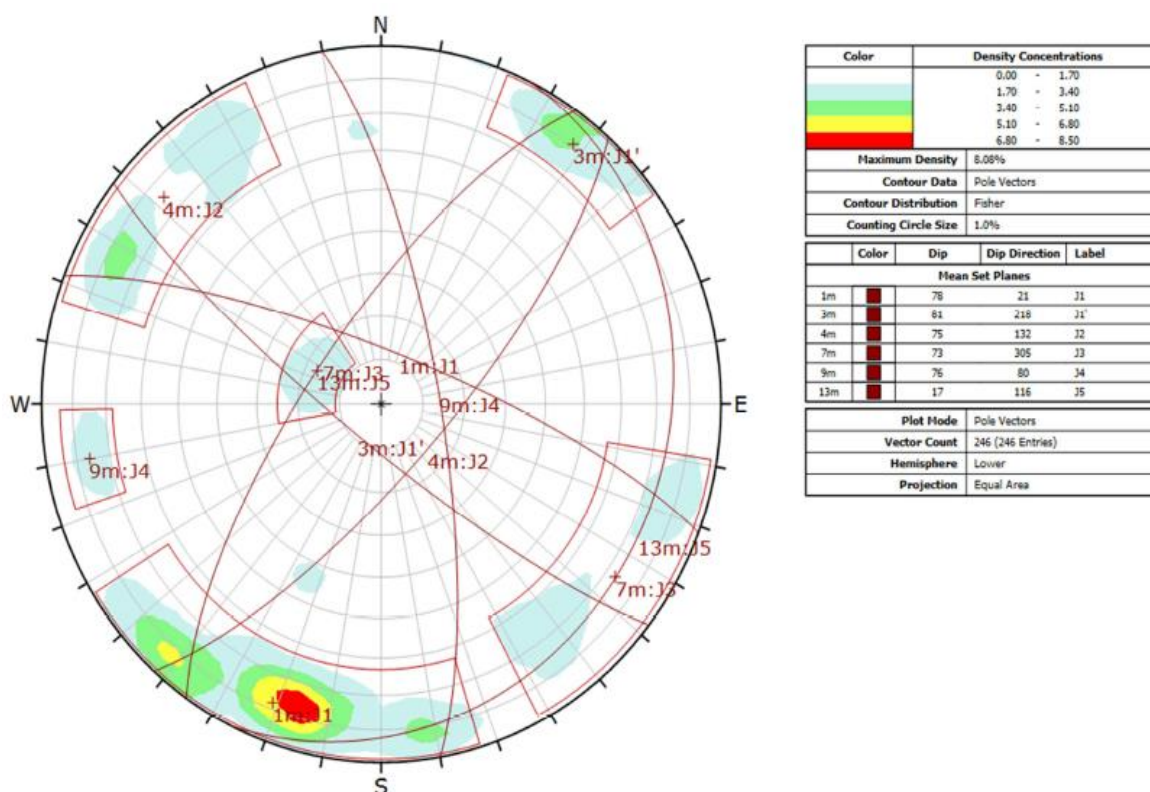


Fig. 3.15 - Famílias de Projeto (túnel 3 entre as progressivas pk1+825 e pk1+891)

As famílias mais frequentes cartografadas nas escavações são as famílias J1 e J1', que são coincidentes com a foliação gnáissica – Sn, bandado gnáissico – e com as falhas regionais. Estas famílias possuem direções semelhantes, porém mergulhos altos para quadrantes opostos. As falhas são designadas como J1 (F) e J1' (F).

Abaixo são apresentadas as atitudes (dip direction/ dip) das principais famílias de discontinuidades consideradas em projeto:

DESCONTINUIDADES VERTICAIS, SUBPARARELAS AO EIXO DOS TÚNEIS

- J1:021/78 – Fraturas subverticais, com mergulho para NE, associadas à foliação gnáissica e às falhas regionais;
- J1':218/81 – Fraturas subverticais com mergulho para SW, associadas à foliação gnáissica e às falhas regionais;

DESCONTINUIDADES VERTICAIS, SUBPERPENDICULARES AO EIXO DOS TÚNEIS

- J2: 132/75 – Fraturas subverticais com mergulho para SE;
- J3: 307/73 – Fraturas subverticais com mergulho para NW;
- J4: 080/76 – Fraturas subverticais com mergulho para NE;

DESCONTINUIDADES SUB-HORIZONTAIS

- J5: 116/17 – Fraturas sub-horizontais com mergulho para SE.

A validade das famílias de projeto (Figura 3.15) na definição do tratamento geotécnico dos túneis de adução foi feita em retro-análise. Consideram-se trechos de 200 metros de túnel e fez-se uma comparação entre as famílias cartografadas em cada trecho e as famílias de projeto. Na Figura 3.16 apresenta-se, a título de exemplo, os estereogramas de densidade dos pólos de descontinuidades elaborados para o túnel de adução 3.

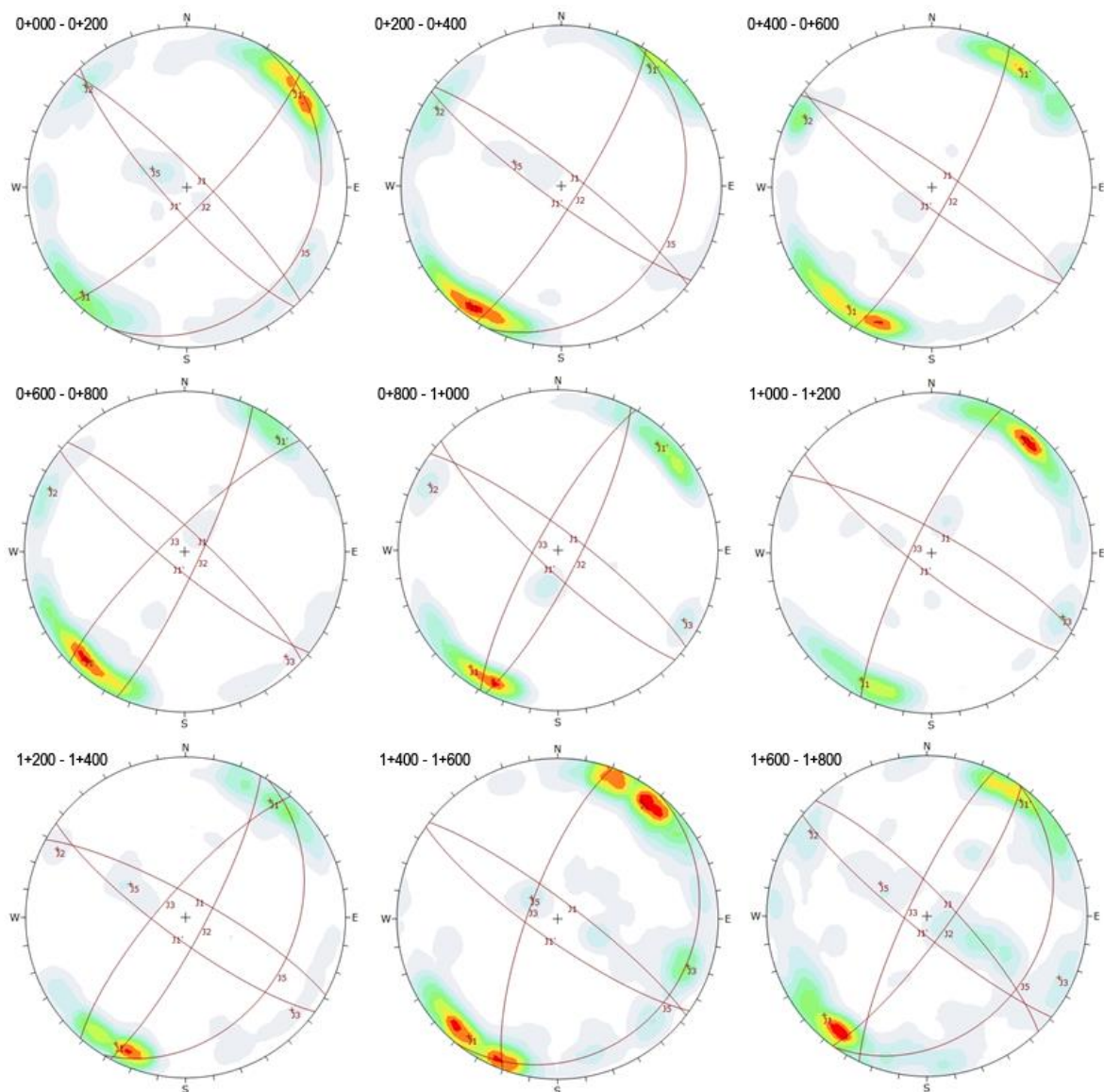


Fig. 3.16 - Famílias de descontinuidades definidas em trechos de 200 metros de túnel para o túnel de adução 3

Tabela 3.2- Famílias de descontinuidades definidas em trechos de 200 m no túnel de adução 3

FAMÍLIAS DE PROJETO	J1	J1'	J2	J3	J4	J5
ATITUDE MÉDIA DE PROJETO	021/78	218/81	132/75	307/73	080/76	116/17
TRECHOS DO TA03	FAMÍLIAS DEFINIDAS EM CADA TRECHO DE 200 METROS					
0+000 - 0+200	045/82	228/79	135/79	-	-	118/20
0+200 - 0+400	038/82	216/82	122/81	-	-	117/27
0+400 - 0+600	035/80	217/81	119/80	-	-	
0+600 - 0+800	043/80	219/81	115/82	316/80	-	-
0+800 - 0+1000	037/80	223/80	117/79	299/79	-	-
0+1000 - 0+1200	029/79	218/81	-	296/80	-	
0+1200 - 0+1400	029/79	216/79	118/80	311/77	-	121/33
0+1400 - 0+1600	037/81	215/79	-	290/75	-	129/17
0+1600 - 0+1800	046/78	219/82	126/79	295/80	-	125/29

Pela análise dos estereogramas da Figura 3.16 e pelos dados compilados na Tabela 3.2, pode-se afirmar que as famílias de descontinuidades identificadas durante a escavação do túnel de adução 3 têm correspondência nas famílias de descontinuidades definidas em projeto. Uma primeira consequência desta constatação é concluir que, estatisticamente, o tratamento geotécnico definido em projeto atende às condições geológicas do maciço.

3.4. TRATAMENTOS GEOTÉCNICOS

A estimativa dos tratamentos geotécnicos dos túneis de adução foi feita utilizando o ábaco do sistema de classificação Geomecânica de Barton com base no índice Q - Barton, na dimensão do vão da escavação e no coeficiente ESR (*Excavation Support Ratio*) função da finalidade da escavação.

A dimensão da secção transversal dos 6 túneis de adução é uniforme e apresenta-se na Figura 3.17, salientando-se um comprimento do vão maior de 10,10 m.

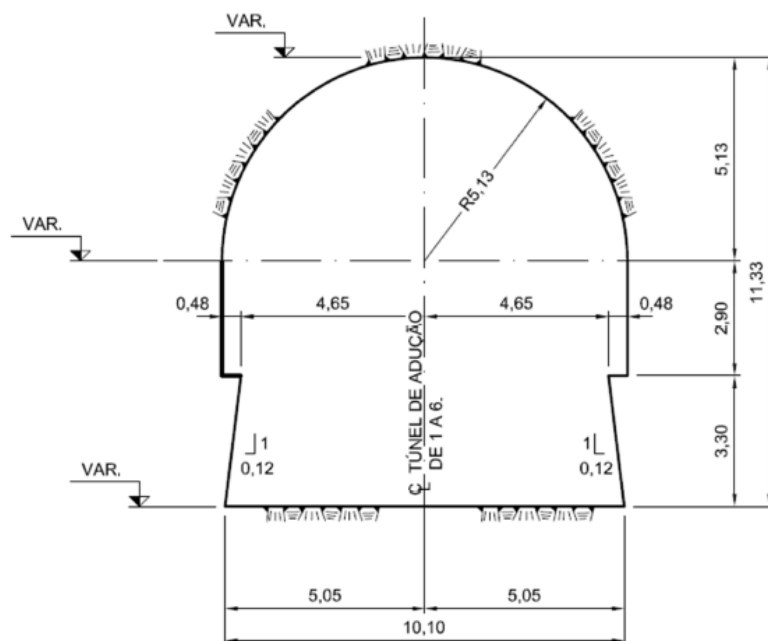


Fig. 3.17 - Dimensões dos túneis de adução

Os túneis da obra hidráulica em questão foram incluídos na categoria E da Tabela 2.11, pelo que o valor atribuído ao parâmetro geotécnico ESR foi de 1 permitindo obter, através da expressão (12), um valor de diâmetro equivalente de 10,10 m. Com base no critério empírico do ábaco de recomendação de suporte de Barton, demonstrado na Figura 3.23, utilizou-se no dimensionamento dos túneis de adução a classificação e respectivos meios de suporte conforme demonstrado na Tabela 3.3.

:

Tabela 3.3 - Classificação do maciço rochoso e respectivos meios de suporte utilizados no tratamento geotécnico dos túneis de adução do circuito hidráulico

Classe	Q - Barton	Suporte
Classe I	$Q > 20$	8 cm de betão projetado com fibras + ancoragens eventuais
Classe II	$3,0 < Q < 20$	8 cm de betão projetado com fibras + ancoragens espaçadas de 2,3 m
Classe III	$0,3 < Q < 3,0$	8 cm de betão projetado com fibras + ancoragens espaçadas de 1,7 m
Classe IV	$0,01 < Q < 0,3$	15 cm de betão projetado convencional + tela de aço + ancoragens espaçadas de 1,4 m
Classe V	$< 0,01$	30 cm de betão projetado convencional + tela de aço + ancoragens espaçadas de 1,0 m + cambotas

O comprimento aproximado das ancoragens na abóboda e nas paredes foi definido com base na fórmula empírica de Barton et al. (1974) [1] segundo as expressões (19) e (20) respetivamente. Tendo-se obtido para ambos um valor mínimo de 4 metros de comprimento de ancoragem nos 6 túneis de adução

O tratamento geotécnico aplicado para avanços em maciços de classe I, II e III foi executado de forma definitiva englobando, dentro do ciclo de escavação, a aplicação do betão projetado, ancoragens e drenos barbacãs eventuais e fora do ciclo de escavação a aplicação dos drenos profundos. O tratamento geotécnico aplicado para avanços em maciços de classe IV e V foi dividido em duas fases. Dentro do ciclo de escavação era aplicado o tratamento primário – betão projetado, ancoragens e drenos barbacãs eventuais – posteriormente, fora do ciclo de escavação, era aplicado o tratamento secundário- aplicação do betão estrutural-.

Nas Figuras 3.18 a 3.22 apresenta-se de forma mais pormenorizada o tratamento geotécnico utilizado por classe de maciço rochoso.

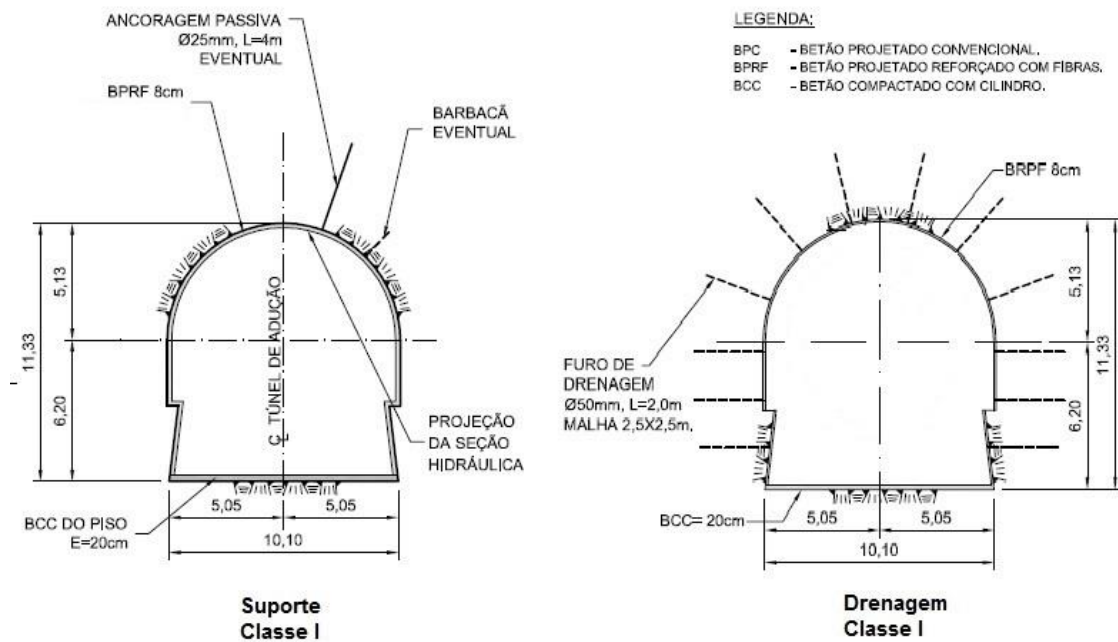


Fig. 3.18 - Tratamento geotécnico aplicado nos maciços de classe I ($Q>20$)

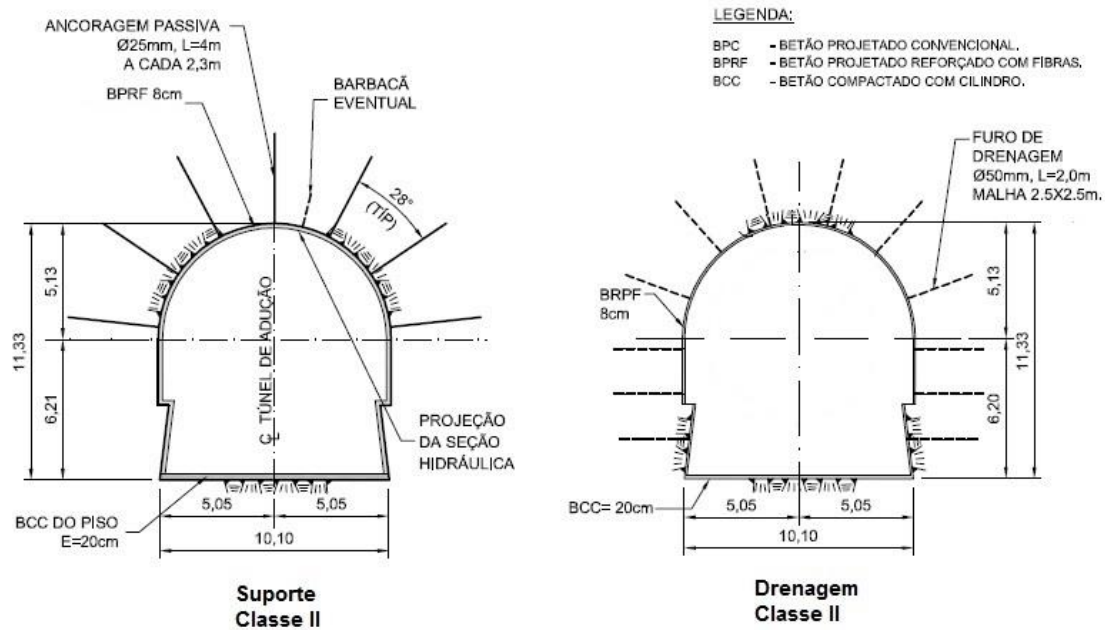


Fig. 3.19 - Tratamento geotécnico aplicado nos maciços de classe II ($3,0 < Q < 20$)

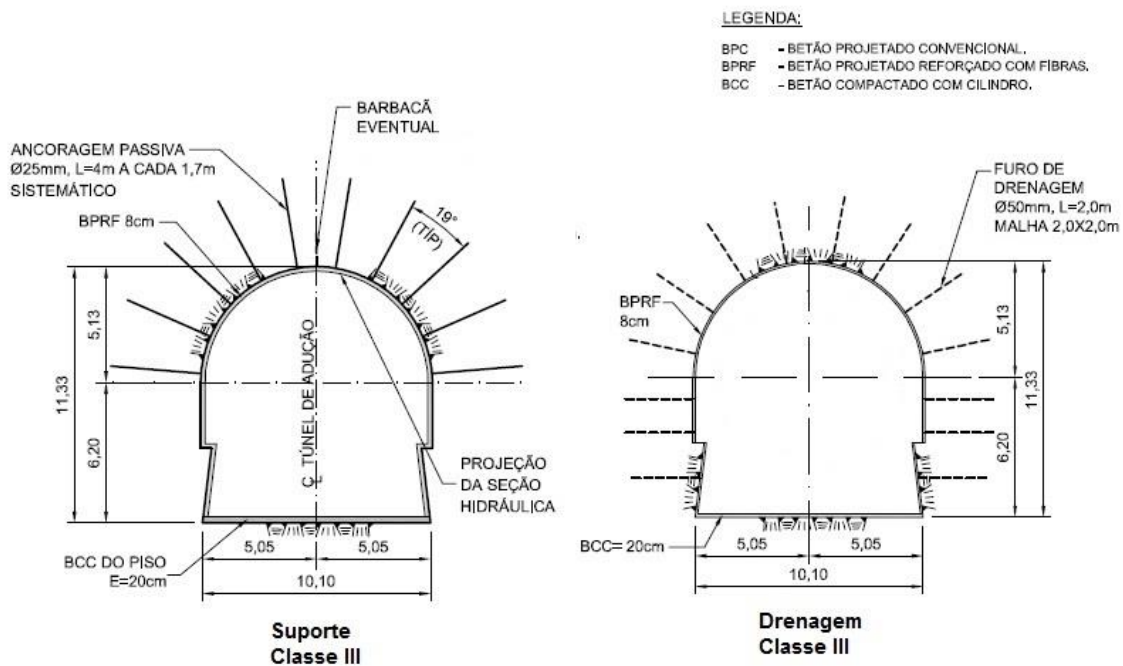


Fig. 3.20 - Tratamento geotécnico aplicado nos maciços de classe III ($0,3 < Q < 3,0$)

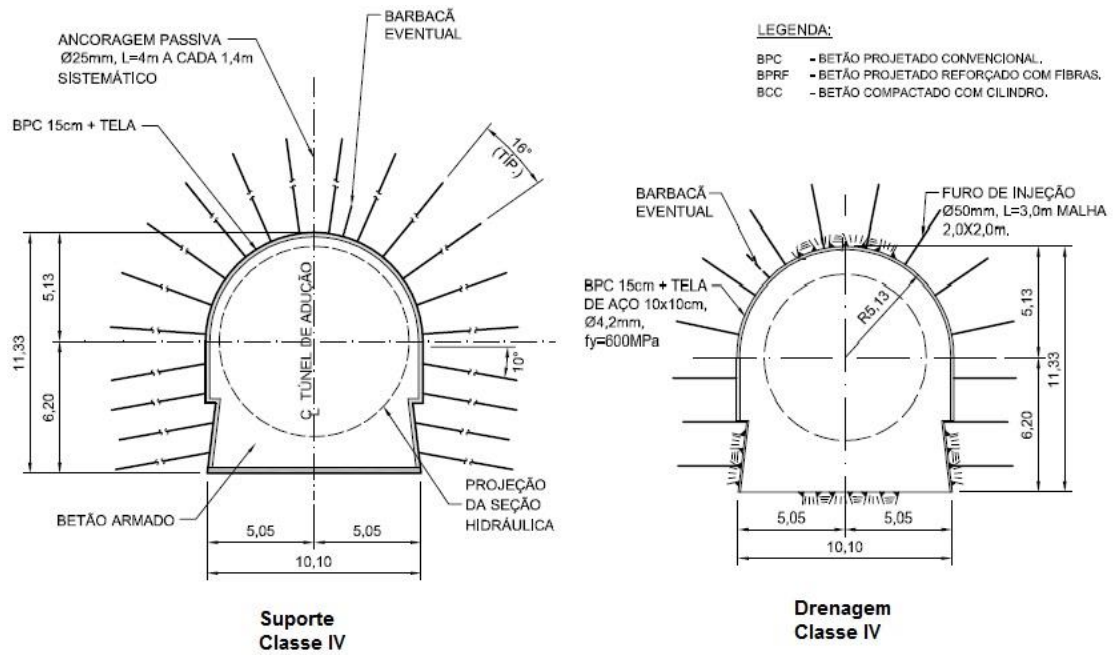


Fig. 3.21 - Tratamento geotécnico aplicado nos maciços de classe IV ($0,01 < Q < 0,3$)

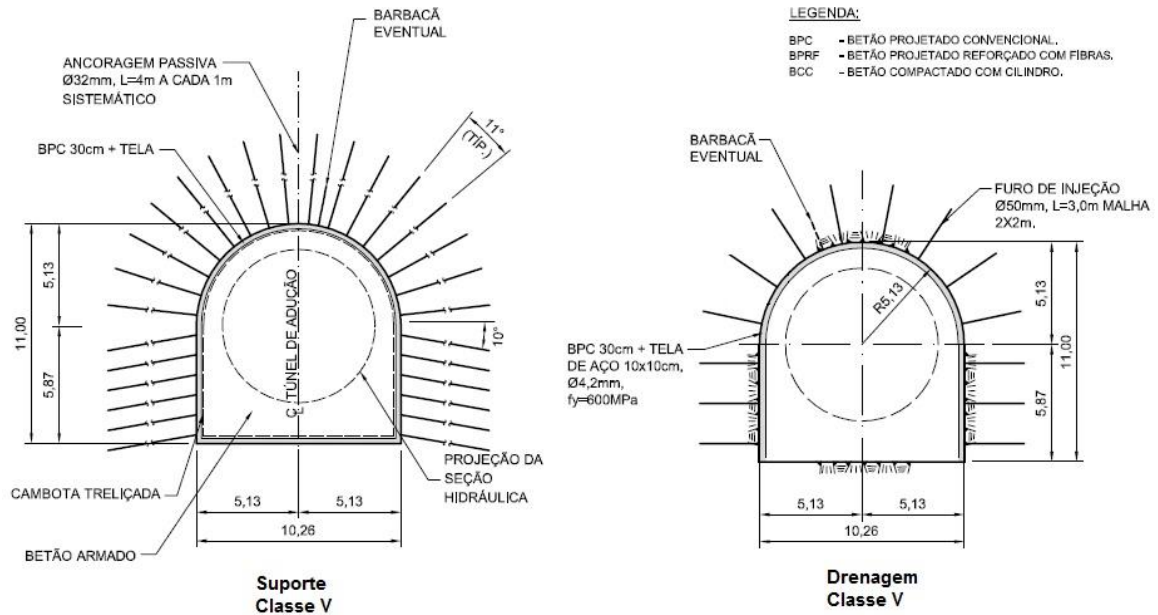


Fig. 3.22 - Tratamento geotécnico aplicado nos maciços de classe V ($Q < 0,01$)

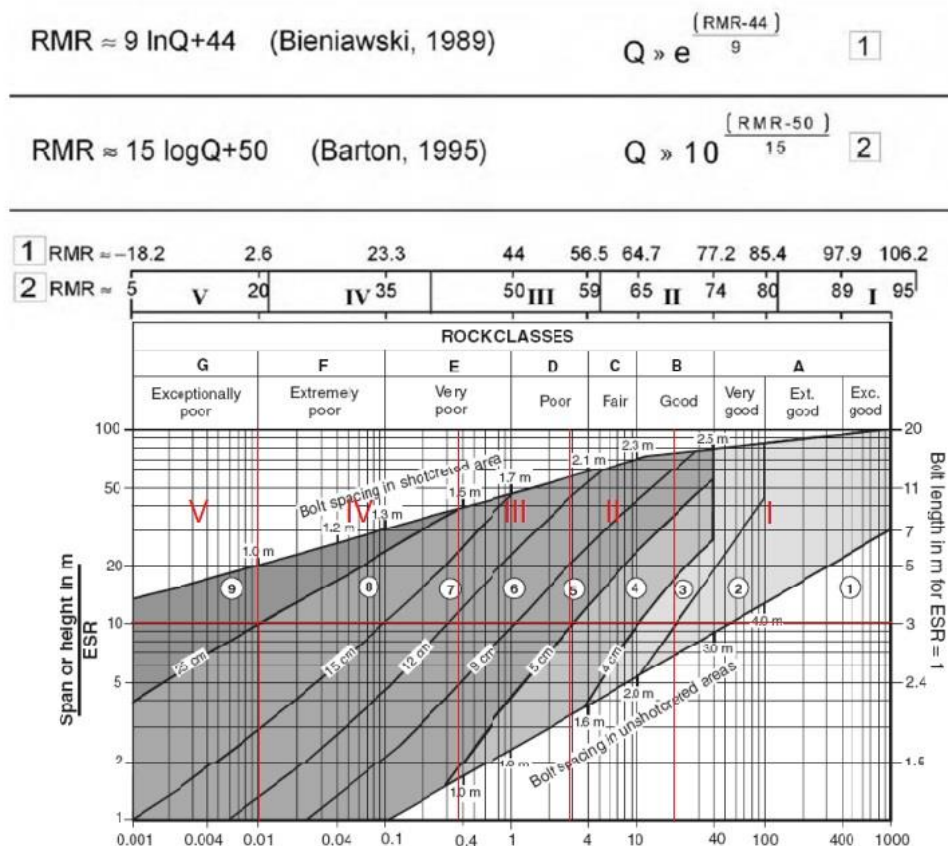


Fig. 3.23 - Ábaco do sistema de classificação de Barton com estimativa de suportes necessários para os túneis de adução com diâmetro equivalente de 10,10 para as 5 classes de maciço (Barton, 2002) [23]

A verificação dos tratamentos para as diferentes classes de maciço rochoso foi realizada seguindo a lógica dos comportamentos geomecânicos esperados para os mesmos.

Para as classes de maciço II e III, cujos comportamentos estão relacionados ao controle estrutural de formação de cunhas rochosa, foi feita uma análise cinemática das cunhas potenciais considerando a orientação das descontinuidades e orientação dos túneis de adução. Para as classes IV e V, cujo comportamento esperado está relacionado a fenômenos de debilitamento progressivo do maciço rochoso com tendência à formação de capelas de diferentes tamanhos, foram executadas análises tensão-deformação do maciço rochoso.

Tendo em conta a natureza do trabalho estes tipos de estudos não vão ser descritos neste trabalho.

4

OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DO Q- BARTON

4.1. INTRODUÇÃO

Cada maciço rochoso, fruto da sua natureza, apresenta especificidades distintas e como tal, no acompanhamento de uma obra subterrânea, as características essenciais a considerar nem sempre são as mesmas, dependendo de inúmeros elementos. O tipo de trabalho e metodologia desenvolvido no acompanhamento de uma escavação de obras subterrâneas em rocha, tendo em consideração a sua finalidade, ou seja, não só a simples caracterização geológica mas também a avaliação da estabilidade da escavação, pode levar muitas vezes a considerar uns parâmetros mais relevantes em detrimento de outros. No caso do acompanhamento geológico-geotécnico de escavação de túneis em maciços rochosos, a necessidade de se efetuar uma avaliação do estado de estabilidade e da necessidade da aplicação de suporte primário, levou ao longo do tempo ao desenvolvimento de metodologia de classificação dos maciços, ainda que de forma empírica.

A falta de normas e de especificações quanto aos elementos a recolher, particularmente na avaliação de um maciço rochoso recorrendo a classificações geomecânicas, tem como consequência a inclusão de fatores subjetivos intrínsecos ao observador na obtenção dos parâmetros necessários, como a experiência profissional, levando a que cada técnico realize uma seleção pessoal de quais os parâmetros a considerar e como os considerar. Associada a esta subjetividade na obtenção dos parâmetros de classificação geomecânica de um maciço rochoso está associado um certo risco geotécnico que tem duas vertentes: uma avaliação mais conservativa que se traduz num tratamento sobre dimensionado, pelo lado da segurança, com mais custos e dilatação do prazo de execução; uma avaliação mais otimista quanto às características do maciço rochoso que se traduz em custos menores e execuções mais rápidas mas que se pode revelar desastrosa pelo lado da segurança.

Neste capítulo procurou-se fazer uma medição objetiva dos parâmetros RQD, J_n , J_r e J_a da classificação geomecânica do Q - Barton, pretendendo, assim, reduzir as incertezas e erros associados a estes mesmos e estudar estatisticamente as suas consequências na classificação do maciço e respetivo tratamento geotécnico.

4.2. AMOSTRAGEM DO ESTUDO

A amostra utilizada neste estudo compreendeu quarenta e oito frentes de desmorte em túnel com as características que se resumem na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características das amostras do estudo

Número de frentes de desmonte em túnel	48	
Geologia dos túneis	Gnaisses anfibolíticos	
Frentes em secção total - 103 m2	40% (avanço médio de 5.66m)	100%
Frentes em secção parcial (Fase 1: abóbada e hasteal) - 70 m2	60% (avanço médio de 3.84m)	
Frentes em Classe I ($Q - Barton > 20$)	0%	100%
Frentes em Classe II ($3 < Q - Barton < 20$)	67%	
Frentes em Classe III ($0.3 < Q - Barton < 3$)	31%	
Frentes em Classe IV ($0.01 < Q - Barton < 0.3$)	2%	
Frentes em Classe V ($Q - Barton < 0.01$)	0%	

A seleção das frentes de desmonte não correspondeu a nenhum critério estatístico de amostragem pelo que não são representativas dos túneis de adução do circuito hidráulico utilizado neste estudo. Inversamente, esta amostra será representativa dos túneis de um circuito hidráulico cujas características globais, em termos dos dois tipos de secções do desmonte e das três classes de maciço rochoso, sejam estatisticamente representados pela amostra estudada.

Os dados utilizados neste estudo são, conforme exposto acima, provenientes de duas origens (Tabela 4.2):

- Dados da obra. Valores dos parâmetros do Q- Barton obtidos pelos técnicos na frente de obra e que foram utilizados para definir o tratamento geotécnico em cada avanço. Por avanço foi considerado um valor de Q - Barton calculado com base em seis valores correspondentes aos seis parâmetros de base;
- Dados calculados em gabinete. No desenvolvimento deste estudo foram adotados vários processos de cálculo objetivo dos parâmetros do Q - Barton. Esta abordagem traduziu-se na determinação de vários valores para os parâmetros que em combinações de seis gerou um máximo de 108 valores de Q - Barton para cada frente de avanço – para cada valor de Q - Barton de obra –, conforme se regista na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Quantidades de valores considerados neste estudo para cada parâmetro do Q - Barton

	Quantidade de dados da obra (Determinados na frente de obra)	Quantidade máxima de dados de gabinete (Determinados neste estudo)
Valores do Q - Barton	1	108
Valores de RQD	1	3
Valores de J_n	1	4
Valores de J_r	1	3
Valores de J_a	1	3
Valores de J_w	1	1*
Valores de SRF	1	1*

* - foi adotado o valor determinado em obra

Para o cálculo dos parâmetros do Q - Barton considerados neste estudo foi necessário escolher metodologias de cálculo, estabelecer critérios de recolhas de dados geológico-geotécnicos e fazer opções quanto à valorização dos dados de campo. Neste capítulo explanam-se estes procedimentos.

Por se tratarem, em muitos casos, de abordagem originais, são passíveis de crítica e de melhoramentos em futuros desenvolvimentos.

No circuito hidráulico estudado, os dados relativos à geologia-geotecnia da frente e características das discontinuidades foram recolhidos, no caso geral, em avanços de escavação de 5 em 5 metros. Estes intervalos não coincidiram, em nenhum dos casos, com os avanços das frentes de obra utilizadas neste estudo. Por este motivo, no estudo das secções da amostragem, os dados utilizados para determinação dos parâmetros do Q de Barton foram obtidos seguindo dois critérios:

- Consideração de 5 metros de túnel. Foram utilizadas as características das discontinuidades cartografadas na frente de obra dos 5 metros mais representativos, isto é, que incluíam uma maior percentagem do trecho da secção de estudo (ver exemplo da Figura 4.1). No caso do trecho da secção estudada estar incluída de forma igual entre duas zonas cartografadas, o estudo foi feito com os dados de ambas as zonas tendo-se utilizado a zona mais penalizante relativamente ao índice de qualidade Q - Barton (ver exemplo da Figura 4.2).
- Consideração de 10 metros de túnel. Foram utilizadas as características das discontinuidades cartografadas na frente de obra dos 10 metros que incluíam o trecho da secção estudada (ver exemplo da Figura 4.3). No caso de o trecho da secção de estudo estar integralmente incluído numa zona de 5 metros cartografada, os outros 5 metros da zona cartografada correspondem aos imediatamente a seguir no sentido oposto ao do avanço do respetivo túnel (ver exemplo da Figura 4.4).

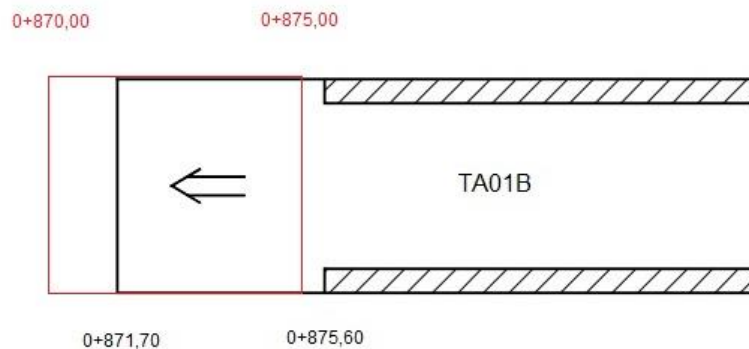


Fig. 4.1 - Exemplo dos 5 metros de segmento utilizado na caracterização da secção de estudo de avanço 0+871,70 a 0+875,60 pertencente ao TA01, frente B

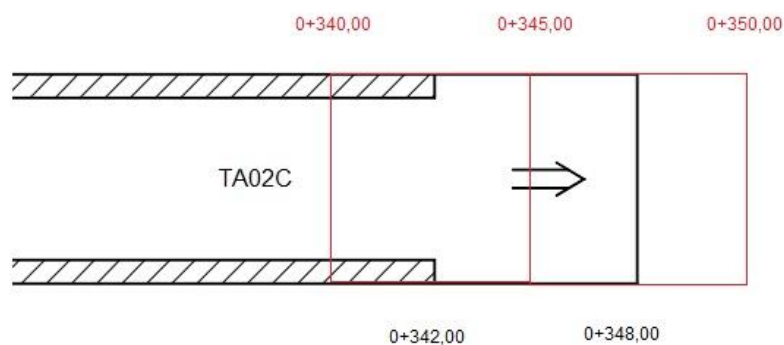


Fig. 4.2 - Exemplo dos dois segmentos de 5 metros utilizado na caracterização da secção de estudo de avanço 0+342,00 a 0+348,00 pertencente ao TA02, frente C

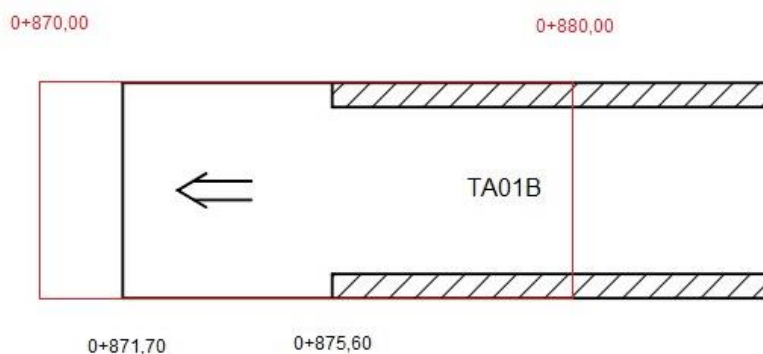


Fig. 4.3 - Exemplo dos 10 metros de segmento utilizado na caracterização da secção de estudo de avanço 0+871,70 a 0+875,60 pertencente ao TA01, frente B

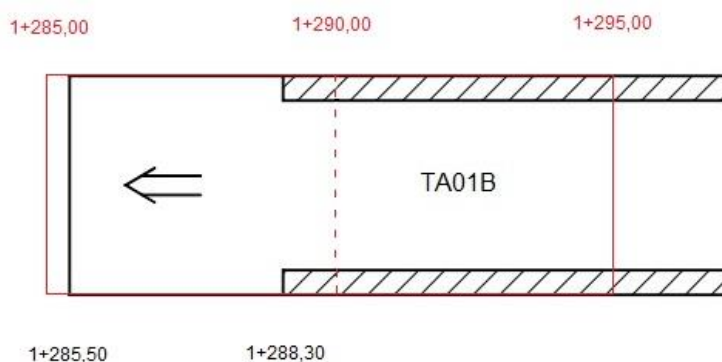


Fig. 4.4 - Exemplo dos 10 metros de segmento utilizado na caracterização da secção de estudo de avanço 1+285,50 a 1+288,30 pertencente ao TA01, frente B

Na Tabela 4.3 apresenta-se, organizados pelo respetivo túnel de adução, as zonas cartografadas utilizadas no estudo estatístico de cada secção segundo os critérios acima descritos.

Tabela 4.3 - Zona cartografa dos casos de estudo

TA/frente	Secção	Zona Cartografada (5m)	Zona Cartografada (10m)
TA1 B	0+871.70 a 0+875.60	0+870,00 a 0+875,00	0+870,00 a 0+880,00
TA1 B	0+961.90 a 0+966.10	0+960,00 a 0+965,00	0+960,00 a 0+970,00
TA1 B	1+285.50 a 1+288.30	1+285,00 a 1+290,00	1+285,00 a 1+295,00
TA1 B	1+370.70 a 1+373.80	1+370,00 a 1+375,00	1+370,00 a 1+380,00
TA1 B	1+384.80 a 1+388.50	1+385,00 a 1+390,00	1+380,00 a 1+390,00
TA1 C	0+825.00 a 0+831.00	0+825,00 a 0+830,00	0+825,00 a 0+835,00
TA2 B	1+006.80 a 1+010.90	1+005,00 a 1+010,00	1+005,00 a 1+015,00
TA2 B	1+329.40 a 1+331.50	1+330,00 a 1+335,00	1+325,00 a 1+335,00
TA2 B	1+412.70 a 1+416.60	1+410,00 a 1+415,00	1+410,00 a 1+420,00
TA2 C	0+342.00 a 0+348.00 (A)	0+340,00 a 0+345,00	0+340,00 a 0+350,00
TA2 C	0+342.00 a 0+348.00 (B)	0+345,00 a 0+350,00	0+340,00 a 0+350,00
TA2 C	0+501.50 a 0+506.00	0+500,00 a 0+505,00	0+500,00 a 0+510,00
TA2 C	0+881.50 a 0+885.50	0+880,00 a 0+885,00	0+880,00 a 0+890,00
TA3 B	1+361.70 a 1+365.90	1+360,00 a 1+365,00	1+360,00 a 1+370,00
TA3 B	1+406.10 a 1+410.50	1+405,00 a 1+410,00	1+405,00 a 1+415,00
TA3 B	1+117.80 a 1+121.10	1+115,00 a 1+120,00	1+115,00 a 1+125,00
TA3 C	0+692.00 a 0+698.00 (A)	0+690,00 a 0+695,00	0+690,00 a 0+700,00
TA3 C	0+692.00 a 0+698.00 (B)	0+695,00 a 0+700,00	0+690,00 a 0+700,00
TA3 C	0+804.00 a 0+810.00	0+805,00 a 0+810,00	0+800,00 a 0+810,00
TA3 C	0+904.50 a 0+910.50	0+905,00 a 0+910,00	0+900,00 a 0+910,00
TA4 B	1+005.60 a 1+008.90	1+005,00 a 1+010,00	1+005,00 a 1+015,00
TA4 B	1+030.70 a 1+034.80	1+030,00 a 1+035,00	1+030,00 a 1+040,00
TA4 B	1+113.30 a 1+117.40	1+115,00 a 1+120,00	1+110,00 a 1+120,00
TA4 B	1+201.30 a 1+205.40	1+200,00 a 1+205,00	1+200,00 A 1+210,00
TA4 B	1+320.20 a 1+323.40	1+320,00 a 1+325,00	1+320,00 a 1+330,00
TA4 B	1+327.20 a 1+330.40	1+325,00 a 1+330,00	1+325,00 a 1+335,00
TA4 B	1+399.20 a 1+403.10	1+400,00 a 1+405,00	1+395,00 a 1+405,00
TA4 B	1+423.40 a 1+427.30	1+425,00 a 1+430,00	1+420,00 a 1+430,00
TA4 B	1+439.80 a 1+444.50	1+440,00 a 1+445,00	1+435,00 a 1+445,00
TA4 B	1+587.40 a 1+591.30	1+585,00 a 1+590,00	1+585,00 a 1+595,00
TA4 C	0+751.50 a 0+757.00	0+750,00 a 0+755,00	0+750,00 a 0+760,00
TA4 C	0+757.00 a 0+763.50	0+760,00 a 0+765,00	0+755,00 a 0+765,00
TA4 C	0+770.50 a 0+776.00	0+770,00 a 0+775,00	0+770,00 a 0+780,00
TA4 C	0+867.00 a 0+872.50	0+865,00 a 0+870,00	0+865,00 a 0+875,00
TA4 C	0+988.00 a 0+994.00	0+990,00 a 0+995,00	0+985,00 a 0+995,00
TA5 B	0+907.60 a 0+912.00	0+905,00 a 0+910,00	0+905,00 a 0+915,00
TA5 B	0+927.70 a 0+930.90	0+925,00 a 0+930,00	0+925,00 a 0+935,00
TA5 B	0+930.90 a 0+934.70	0+930,00 a 0+935,00	0+930,00 a 0+940,00
TA5 B	1+142.80 a 1+147.10	1+140,00 a 1+145,00	1+140,00 a 1+150,00
TA5 B	1+304.50 a 1+308.80	1+305,00 a 1+310,00	1+300,00 a 1+310,00
TA5 B	1+345.20 a 1+349.20	1+345,00 a 1+350,00	1+345,00 a 1+355,00
TA5 B	1+361.70 a 1+365.30	1+360,00 a 1+365,00	1+360,00 a 1+370,00
TA5 C	0+480.00 a 0+486.00	0+480,00 a 0+485,00	0+480,00 a 0+490,00
TA5 C	0+564.00 a 0+569.50	0+565,00 a 0+570,00	0+560,00 a 0+570,00
TA5 C	0+790.00 a 0+796.00	0+790,00 a 0+795,00	0+790,00 a 0+800,00
TA5 C	0+850.00 a 0+855.50	0+850,00 a 0+855,99	0+850,00 a 0+860,00
TA5 C	0+866.50 a 0+872.50	0+865,00 a 0+870,00	0+865,00 a 0+875,00
TA6 B	1+094.40 a 1+099.10	1+095,00 a 1+100,00	1+090,00 a 1+100,00
TA6 C	0+701.50 a 0+707.00	0+700,00 a 0+705,00	0+700,00 a 0+710,00
TA6 C	0+822.50 a 0+829.00	0+825,00 a 0+830,00	0+820,00 a 0+830,00

4.3. OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DE Q - BARTON

Na realização deste estudo, foi utilizada uma amostragem com dados reais de uma obra hidráulica, permitindo comparar todos os elementos obtidos com os valores estimados e utilizados na classificação do maciço pelos técnicos na frente de obra. Os parâmetros geotécnicos foram analisados e tratados tendo como apoio a base de dados das características do maciço e das discontinuidades de todos os avanços dos seis túneis de adução.

O parâmetro J_w não foi alvo de qualquer estudo no presente trabalho, devido à quase invariância deste parâmetro em todo o circuito hidráulico num maciço rochoso que se revelou quase impermeável. O parâmetro SRF, relacionado com o estado de tensão do maciço rochoso, também não foi tratado neste estudo em virtude da falta de dados objetivos que permitissem quantificar a sua determinação. Em ambos os casos foram adotados os valores que foram utilizados em obra nas classificações geomecânicas das respetivas secções dos túneis de adução.

Na Tabela A1 do anexo A estão representados todos os parâmetros estimados em campo no aproveitamento hidráulico estudado, assim como os valores de Q - Barton utilizados no dimensionamento e tratamento geotécnico de cada secção em obra.

4.3.1. OBTENÇÃO DO PARÂMETRO RQD

O parâmetro RQD foi determinado pelos técnicos na frente de obra em função da experiência individual e da utilização, ou não, de alguma metodologia expedita que permitisse eliminar subjetividades pessoais. Deste modo, calculou-se um valor de RQD em cada frente de obra que foi utilizado no cálculo do índice Q - Barton que esteve na base da definição do tratamento geotécnico a aplicar. Esta cálculo do RQD é designado neste trabalho por “RQD estimado / RQD (obra)”.

Para o desenvolvimento deste trabalho introduziu-se em obra o procedimento de calcular autonomamente o parâmetro RQD pelo menos por um dos três métodos a seguir referidos, e cuja metodologia se explica no primeiro capítulo.

- 1) Método do J_v (Palmstrom, 2002; 2005)
- 2) Método do λ (Hudson & Priest, 1979)
- 3) Método do RQD *in situ* (Palmstrom, 2005)

Os valores obtidos por estes três métodos expeditos, assim como os valores estimados e utilizados em obra na caracterização da respetiva secção encontram-se organizados por túnel de adução na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Valores de RQD estimado em obra e calculado pelos três métodos: J_v , λ e *in situ*

Frente	Progressiva	RQD estimado	RQD calculado		
		RQD (Obra)	Método do J_v	Método do λ	Método do RQD <i>in situ</i>
TA1 B	0+871.70 a 0+875.60	80	100	92	N/A
TA1 B	0+961.90 a 0+966.10	70	77	88	82
TA1 B	1+285.50 a 1+288.30	85	94	95	N/A
TA1 B	1+370.70 a 1+373.80	80	92	64	70
TA1 B	1+384.80 a 1+388.50	85	96	97	N/A
TA1 C	0+825.00 a 0+831.00	90	100	N/A	N/A
TA2 B	1+006.80 a 1+010.90	70	75	94	N/A
TA2 B	1+329.40 a 1+331.50	85	55	67	39
TA2 B	1+412.70 a 1+416.60	85	100	98	N/A
TA2 C	0+342.00 a 0+348.00	90	100	N/A	N/A
TA2 C	0+501.50 a 0+506.00	80	82	N/A	N/A
TA2 C	0+881.50 a 0+885.50	85	100	94	N/A
TA3 B	1+361.70 a 1+365.90	80	75	81	92
TA3 B	1+406.10 a 1+410.50	85	48	74	52
TA3 B	1+117.80 a 1+121.10	75	79	N/A	N/A
TA3 C	0+692.00 a 0+698.00	80	55	N/A	N/A
TA3 C	0+804.00 a 0+810.00	90	85	89	N/A
TA3 C	0+904.50 a 0+910.50	75	75	89	N/A
TA4 B	1+005.60 a 1+008.90	80	86	92	N/A
TA4 B	1+030.70 a 1+034.80	85	89	86	N/A
TA4 B	1+113.30 a 1+117.40	85	79	91	N/A
TA4 B	1+201.30 a 1+205.40	75	84	N/A	N/A
TA4 B	1+320.20 a 1+323.40	65	70	N/A	N/A
TA4 B	1+327.20 a 1+330.40	60	74	58	N/A
TA4 B	1+399.20 a 1+403.10	65	50	49	50
TA4 B	1+423.40 a 1+427.30	65	N/A	37	21
TA4 B	1+439.80 a 1+444.50	65	54	50	30
TA4 B	1+587.40 a 1+591.30	35	77	41	46
TA4 C	0+751.50 a 0+757.00	66,5	N/A	81	N/A
TA4 C	0+757.00 a 0+763.50	50	N/A	61	N/A
TA4 C	0+770.50 a 0+776.00	65	59	N/A	N/A
TA4 C	0+867.00 a 0+872.50	70	52	N/A	N/A
TA4 C	0+988.00 a 0+994.00	80	57	83	N/A
TA5 B	0+907.60 a 0+912.00	60	77	79	74
TA5 B	0+927.70 a 0+930.90	80	43	82	N/A
TA5 B	0+930.90 a 0+934.70	70	71	71	N/A
TA5 B	1+142.80 a 1+147.10	80	85	N/A	N/A
TA5 B	1+304.50 a 1+308.80	70	27	61	60
TA5 B	1+345.20 a 1+349.20	75	91	91	62
TA5 B	1+361.70 a 1+365.30	75	84	92	N/A
TA5 C	0+480.00 a 0+486.00	95	96	97	N/A
TA5 C	0+564.00 a 0+569.50	80	97	81	N/A
TA5 C	0+790.00 a 0+796.00	75	81	N/A	N/A
TA5 C	0+850.00 a 0+855.50	70	68	93	N/A
TA5 C	0+866.50 a 0+872.50	50	96	95	N/A
TA6 B	1+094.40 a 1+099.10	75	41	N/A	N/A
TA6 C	0+701.50 a 0+707.00	90	94	N/A	N/A
TA6 C	0+822.50 a 0+829.00	80	69	97	N/A

Como se pode reparar na Tabela 4.4, e de modo gráfico na Figura 4.5, os valores de RQD estimado em obra e calculados pelos três métodos referidos não são, de um modo geral, coincidentes.

O RQD (obra) tem os valores mais frequentes nos intervalos 60-80%. Os métodos do J_v e do λ registam uma tendência para valores superiores de RQD, com classes as mais frequentes no intervalo 70-100% de RQD. O método do RQD *in situ*, apesar de traduzir uma amostra de apenas sete medições, apresenta valores mais baixos de RQD, mais frequentes nos intervalos 20-30% e 40-50% de RQD.

De modo geral, os valores calculados são superiores aos valores estimados e adotados em obra, o que sugere que se optou por valores conservativos na estimativa deste parâmetro.

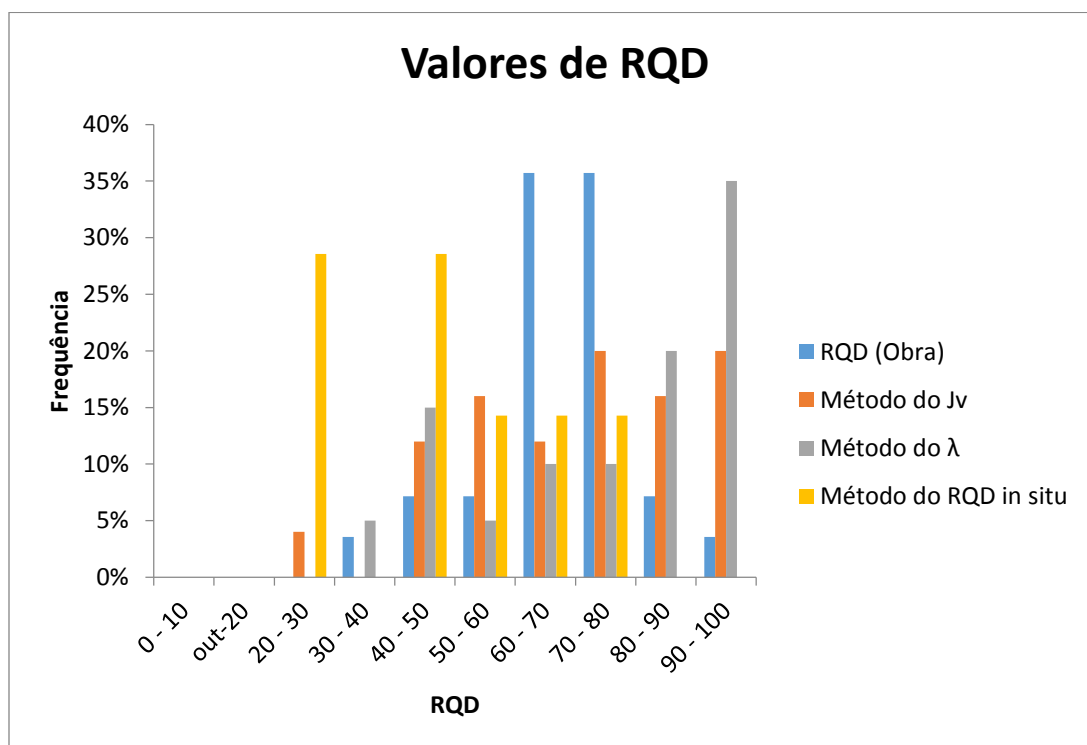


Fig. 4.5 - Histograma com os valores de RQD determinados em obra e calculados por três métodos alternativos

4.3.2. OBTENÇÃO DO PARÂMETRO J_n

O parâmetro J_n , que caracteriza o número de famílias de fraturas num dado maciço, é um parâmetro bastante dependente da experiência do observador e da sua própria definição de famílias de descontinuidades. Uma família é definida por um conjunto de descontinuidades com aproximadamente a mesma orientação e com um espaçamento característico, no entanto não existem critérios absolutamente rígidos que classifiquem um conjunto de fraturas como uma família. A esta ausência de normas específicas na determinação deste parâmetro estão associados erros que podem ter consequências tanto na classificação do maciço rochoso como no suporte a aplicar.

No circuito hidráulico estudado este parâmetro foi determinado na frente de obra pela simples observação do maciço rochoso, as famílias eram constituídas através da visualização direta das

fraturas verificando se estas se encontravam em conformidade com as famílias definidas como famílias de projeto (Figura 3.15). No presente trabalho procedeu-se a avaliação deste parâmetro através da definição estatística das famílias, partindo da projeção estereográfica das descontinuidades considerando a orientação de todas as descontinuidades cartografadas. Foram consideradas todas as descontinuidades do tipo fratura ou diáclase.

Como já foi referido, as descontinuidades na obra eram registadas nas bases de dados em trechos de 5 metros, desde o ponto inicial do ataque a cada túnel de adução. Em nenhum dos quarenta e oito casos estudados a zona cartografada coincidiu com o avanço da secção, pelo que para este parâmetro foram utilizados quatro critérios para a seleção das descontinuidades a projetar, chegando a quatro valores de J_n representativos por cada secção:

- 1) Foram utilizadas as descontinuidades levantadas nos 5 metros mais abrangentes do trecho da secção estudada (Figura 30), sendo que quando o trecho é igualmente abrangido por duas zonas cartografadas é efetuada a avaliação deste parâmetro segundo as duas secções (Figura 4.2). As famílias foram definidas independentemente das famílias de projeto;
- 2) Foram utilizadas as descontinuidades levantadas nos 5 metros mais abrangentes do trecho da secção estudada, sendo que quando o trecho é igualmente abrangido por duas zonas cartografadas é efetuada a avaliação deste parâmetro segundo as duas secções. As famílias foram definidas tendo em consideração as famílias definidas em projeto representadas na Figura 3.15;
- 3) Foram utilizadas as descontinuidades cartografadas na frente de obra dos 10 metros que incluíam o trecho da secção estudada (Figura 4.3), sendo que nos casos em que o comprimento desta secção é integralmente englobado em 5 metros cartografados admitiu-se os restantes 5 metros no sentido oposto ao do avanço do respetivo túnel (Figura 4.4). As famílias foram definidas independentemente das famílias de projeto;
- 4) Foram utilizadas as descontinuidades cartografadas na frente de obra dos 10 metros que incluíam o trecho da secção estudada, sendo que nos casos em que o comprimento desta secção é integralmente englobado em 5 metros cartografados admitiu-se os restantes 5 metros no sentido oposto ao do avanço do respetivo túnel. As famílias foram definidas tendo em consideração as famílias definidas em projeto representadas na Figura 3.15.

Na definição de famílias de descontinuidades foi utilizada a projeção estereográfica de igual área das descontinuidades recorrendo ao programa DIPS v 5.1 desenvolvido pela Rocscience, Inc. De modo a avaliar o parâmetro J_n de forma igual em todos os casos de estudo e reduzir as incertezas associadas à falta de normas, as famílias de descontinuidades foram definidas segundo as seguintes regras:

- Constitui uma família de descontinuidades um conjunto de fraturas superiores ou iguais ao número mínimo descrito na Tabela 4.5, tendo estas, pelo menos, uma concentração dos polos projetados de 10% por 1% de área;
- Constitui uma família de descontinuidades se o número de polos projetados coincidentes com as famílias de descontinuidades de projeto for superior a três (apenas para o critério 2 e 4);
- Considera-se a presença de descontinuidades aleatórias quando o número de polos que não constituem famílias de descontinuidades é superior ou igual a 20% do número total de polos projetados.

Tabela 4.5 - Número de polos mínimo para constituir famílias de descontinuidades

Número total de polos projetados	Número de polos mínimo para constituir família
≤ 15	3
]15 - 25]	3 / 4
]25 - 35]	4 / 5
> 35	5 / 6

Para melhor compreensão do leitor apresenta-se nas Figuras 4.6 a 4.9 a definição das famílias de descontinuidades segundo os quatro critérios acima descritos, para o exemplo da secção de avanço 0+871,70 a 0+875,60, pertencente ao túnel de adução 1 frente B, sintetizando a informação na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Definição de famílias de descontinuidades para a secção de estudo TA01B (0+871,70 a 0+875,60)

TA01B avanço 0+871,70 a 0+875,60				
	1	2	3	4
Critério	5m mais relevantes	5m mais relevantes + fam. Projeto	10m mais relevantes	10m mais relevantes + fam. Projeto
Secção cartografada	(0+870,0 a 0+875,0)	(0+870,0 a 0+875,0)	(0+870,0 a 0+880,0)	(0+870,0 a 0+880,0)
Parâmetro J_n	2 famílias + aleatórias - (6)	2 famílias + aleatórias - (6)	1 família + aleatórias - (3)	3 famílias + aleatórias - (12)

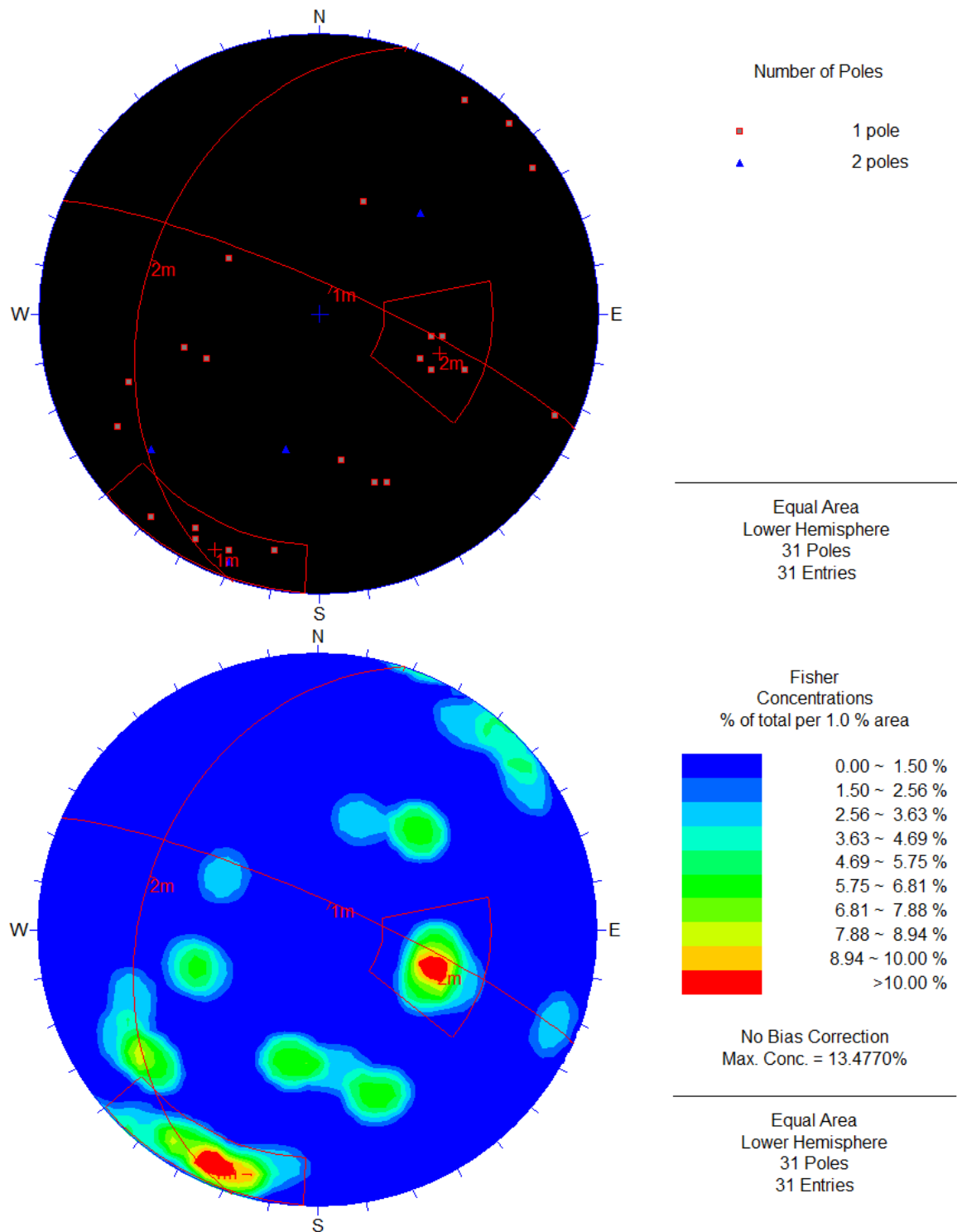


Fig. 4.6 - Exemplo de definição de famílias de descontinuidades segundo o critério 1 (TA01B avanço 0+871,70 a 0+875,60) - definição de 2 famílias + aleatórias

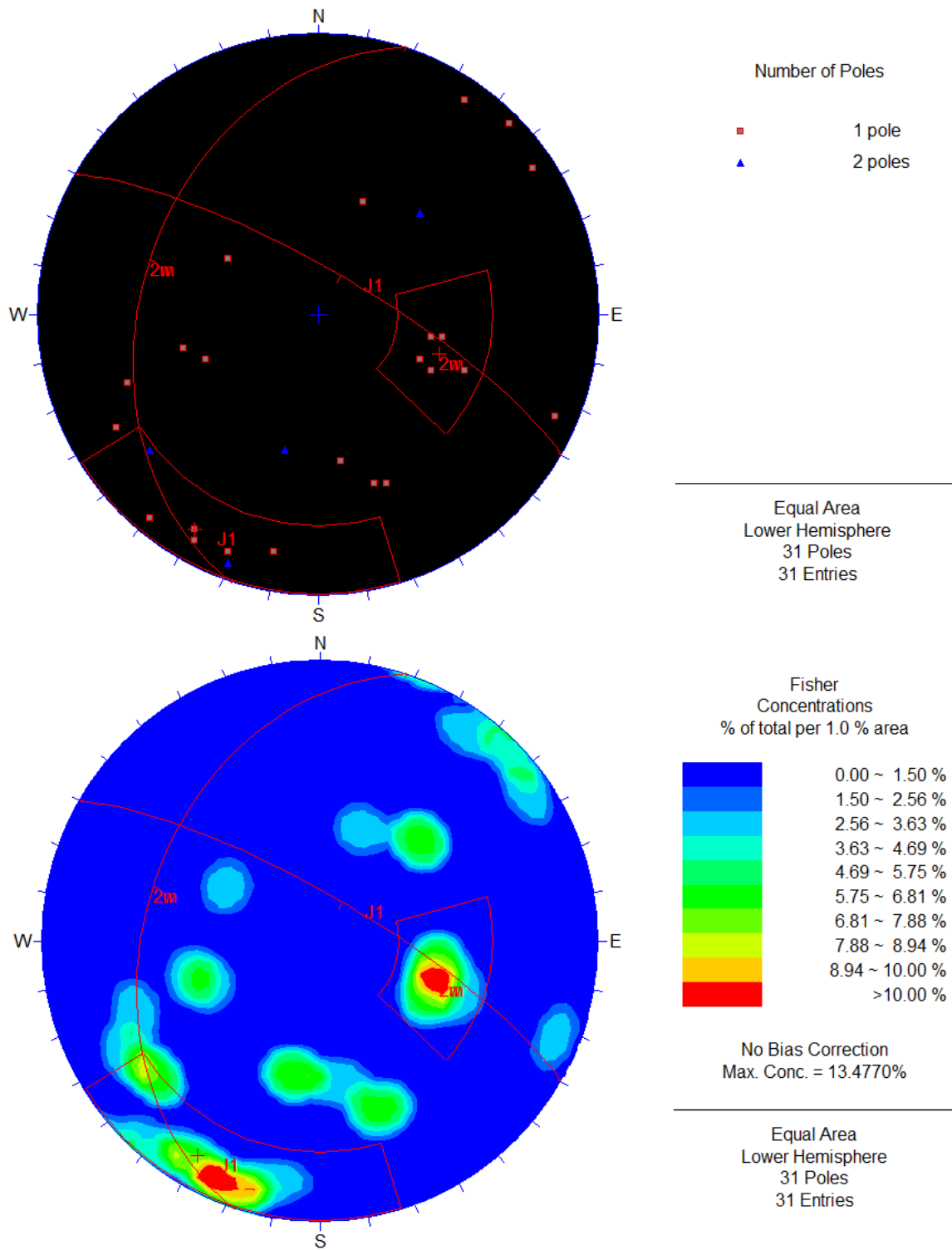


Fig. 4.7 - Exemplo de definição de famílias de descontinuidades segundo o critério 2 (TA01B avanço 0+871,70 a 0+875,60) - definição de 2 famílias + aleatórias

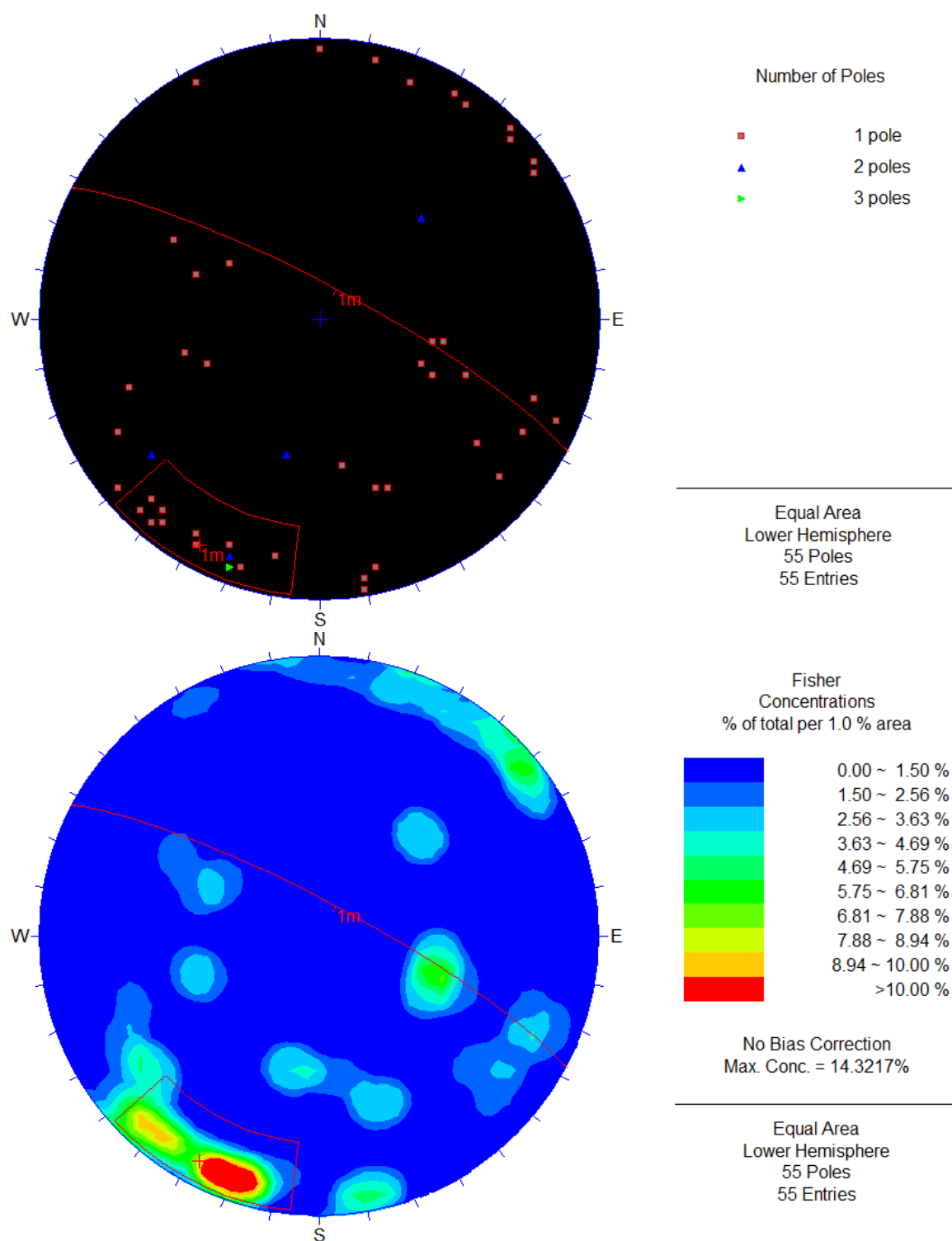


Fig. 4.8 - Exemplo de definição de famílias de discontinuidades segundo o critério 3 (TA01B avanço 0+871,70 a 0+875,60) - 1 família + aleatórias

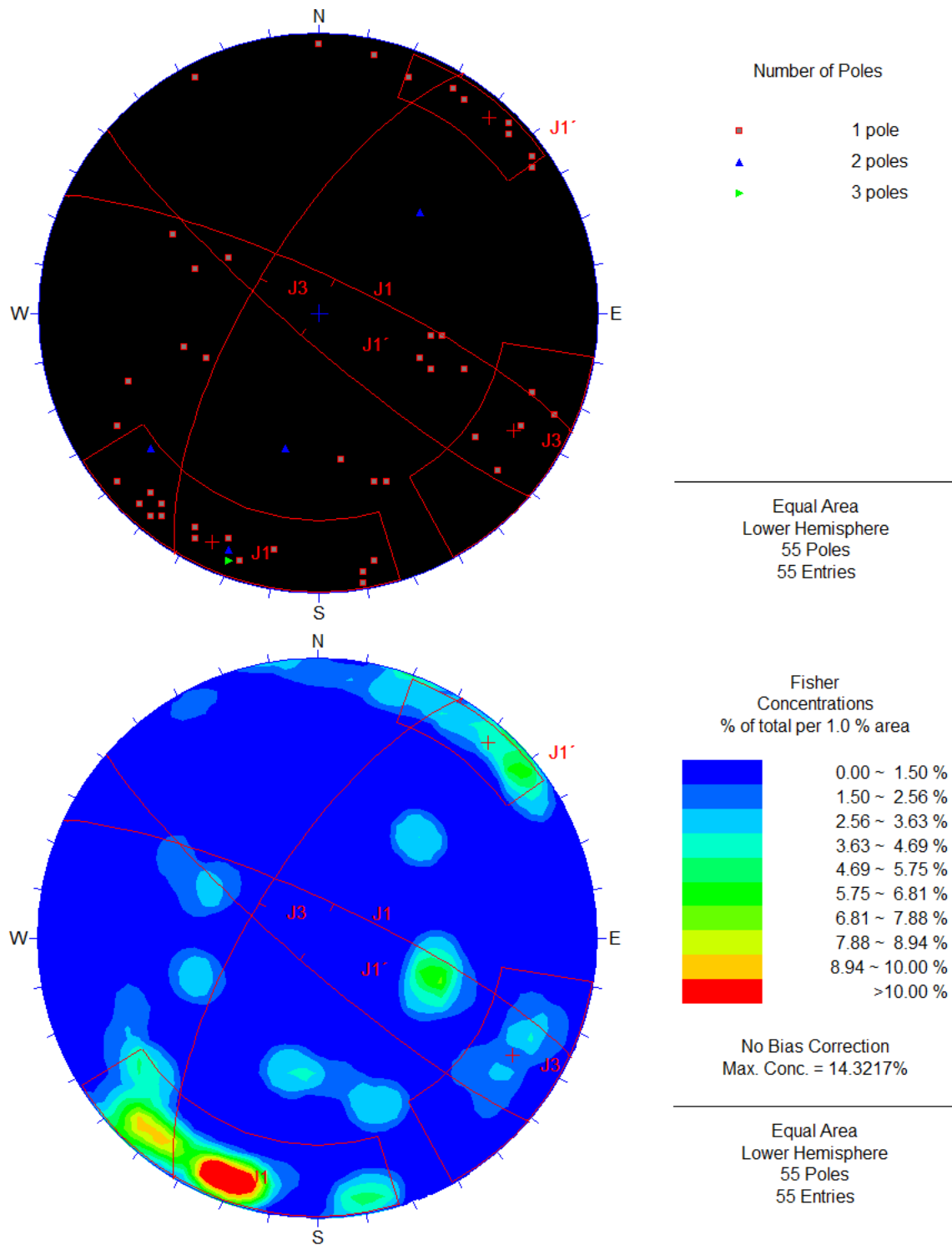


Fig. 4.9 - Exemplo de definição de famílias de descontinuidades segundo o critério 4 (TA01B avanço 0+871,70 a 0+875,60) - 3 famílias + aleatórias

Na Tabela 4.7 apresenta-se os valores obtidos do parâmetro J_n através do procedimento acima descrito assim como os valores adotados em obra para os quarenta e oito casos de estudo. Inclui-se ainda no anexo C as projeções estereográficas utilizadas na avaliação deste parâmetro para todas as secções estudadas.

Tabela 4.7 - Valores do parâmetro J_n obtidos

		Jn estimado	Jn calculado			
Frente	Progressiva	Jn (obra)	Critério			
			(1)	(2)	(3)	(4)
			5m mais relevantes	5m mais relevantes + fam. Projecto	10m mais relevantes	10m mais relevantes + fam. Projecto
TA1 B	0+871.70 a 0+875.60	12	6	6	3	12
TA1 B	0+961.90 a 0+966.10	12	3	6	12	12
TA1 B	1+285.50 a 1+288.30	9	6	6	12	15
TA1 B	1+370.70 a 1+373.80	9	3	12	15	15
TA1 B	1+384.80 a 1+388.50	9	6	6	3	6
TA1 C	0+825.00 a 0+831.00	9	9	9	9	9
TA2 B	1+006.80 a 1+010.90	12	6	12	12	12
TA2 B	1+329.40 a 1+331.50	9	12	12	6	6
TA2 B	1+412.70 a 1+416.60	9	9	9	6	12
TA2 C	0+342.00 a 0+348.00	9	4	4	6	6
TA2 C	0+342.00 a 0+348.00	9	6	6	6	6
TA2 C	0+501.50 a 0+506.00	9	9	9	6	12
TA2 C	0+881.50 a 0+885.50	9	3	6	4	9
TA3 B	1+361.70 a 1+365.90	9	6	6	3	6
TA3 B	1+406.10 a 1+410.50	9	4	4	6	6
TA3 B	1+117.80 a 1+121.10	12	3	6	6	6
TA3 C	0+692.00 a 0+698.00	9	3	3	3	3
TA3 C	0+692.00 a 0+698.00	9	2	2	3	3
TA3 C	0+804.00 a 0+810.00	9	6	9	6	6
TA3 C	0+904.50 a 0+910.50	12	6	12	12	15
TA4 B	1+005.60 a 1+008.90	9	15	9	6	9
TA4 B	1+030.70 a 1+034.80	9	6	9	6	12
TA4 B	1+113.30 a 1+117.40	9	6	6	12	15
TA4 B	1+201.30 a 1+205.40	12	6	6	6	12
TA4 B	1+320.20 a 1+323.40	12	3	3	3	12
TA4 B	1+327.20 a 1+330.40	12	9	9	6	12
TA4 B	1+399.20 a 1+403.10	9	4	4	9	9
TA4 B	1+423.40 a 1+427.30	9	9	9	6	6
TA4 B	1+439.80 a 1+444.50	9	6	6	12	12
TA4 B	1+587.40 a 1+591.30	15	6	9	12	15
TA4 C	0+751.50 a 0+757.00	12	6	6	6	12
TA4 C	0+757.00 a 0+763.50	12	6	6	6	15
TA4 C	0+770.50 a 0+776.00	12	6	6	12	15
TA4 C	0+867.00 a 0+872.50	12	3	3	6	12
TA4 C	0+988.00 a 0+994.00	9	3	6	6	15
TA5 B	0+907.60 a 0+912.00	12	6	6	6	6

Tabela 4.7 - Valores do parâmetro J_n obtidos (continuação)

Frente	Progressiva	Jn estimado	Jn calculado			
		Jn (obra)	Critério			
			(1) 5m mais relevantes	(2) 5m mais relevantes + fam. Projecto	(3) 10m mais relevantes	(4) 10m mais relevantes + fam. Projecto
TA5 B	0+927.70 a 0+930.90	9	9	9	6	6
TA5 B	0+930.90 a 0+934.70	12	4	4	6	9
TA5 B	1+142.80 a 1+147.10	9	6	6	3	6
TA5 B	1+304.50 a 1+308.80	12	6	6	6	12
TA5 B	1+345.20 a 1+349.20	9	9	9	6	6
TA5 B	1+361.70 a 1+365.30	9	6	6	3	6
TA5 C	0+480.00 a 0+486.00	9	12	15	12	15
TA5 C	0+564.00 a 0+569.50	12	3	6	12	12
TA5 C	0+790.00 a 0+796.00	9	4	4	12	12
TA5 C	0+850.00 a 0+855.50	12	6	6	6	6
TA5 C	0+866.50 a 0+872.50	12	3	3	6	6
TA6 B	1+094.40 a 1+099.10	12	3	3	3	3
TA6 C	0+701.50 a 0+707.00	9	4	4	4	4
TA6 C	0+822.50 a 0+829.00	9	3	3	6	15

Analisando os valores de J_n calculados pelos quatro critérios descritos em comparação com os valores de J_n determinados na frente de obra, verifica-se que (Figura 4.10), de modo genérico, os valores de J_n calculados de modo objetivo em gabinete são menores, situação que favorece o índice Q – Barton.

Em obra, quase a totalidade dos valores de J_n estimados ficou nos valores de $J_n = 9$ e $J_n = 12$. A consideração das descontinuidades em trechos de 5 metros (critérios 1 e 2) determina valores de J_n mais baixos, com percentagens consideráveis de valores (40%) de $J_n = 6$, enquanto que a consideração de trechos de 10 metros determina valores de J_n mais altos.

O critério de cálculo que mais se aproxima dos valores de J_n determinados na frente de obra foi o critério 4. Neste critério foi considerado um trecho de 10 metros e para o estabelecimento do número de famílias de descontinuidades entraram as definidas estatisticamente acrescidas das que têm correspondência nas famílias de projeto.

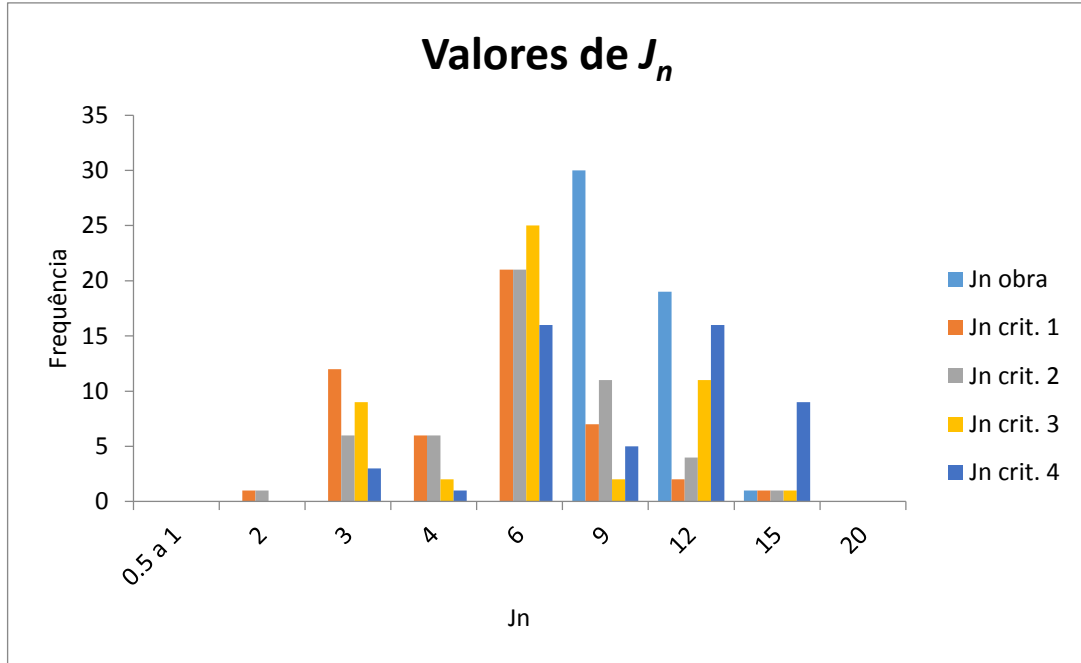


Fig. 4.10 - Histograma com os valores de J_n determinados em obra e calculados por quatro critérios alternativos

4.3.3. OBTENÇÃO DO PARÂMETRO J_r

O parâmetro de rugosidade J_r é um índice do Q - Barton, normalmente, de fácil caracterização em campo mas que pode suscitar dúvidas consoante o tipo e estado das superfícies das descontinuidades. Pelo facto de geralmente ser obtido pela simples observação do maciço, este parâmetro é bastante dependente do julgamento do técnico e da sua própria avaliação das características da superfície das descontinuidades.

No presente trabalho, de forma a obter um valor que fosse representativo da rugosidade das descontinuidades de cada secção escavada, procedeu-se ao cálculo de J_r usando as características de regularidade (IR, ON, PL) e rugosidade (RG, LI, ES) registadas em campo para descrever as descontinuidades cartografadas. A subjetividade associada à determinação de um valor de J_r na frente de obra foi substituído pela análise estatística das características cartografadas em obra. Para seleccionar as descontinuidades a ser consideradas nesta análise estatística adotaram-se três procedimentos alternativos que geram três valores de J_r :

- 1) análise da regularidade e rugosidade da superfície de todas as descontinuidades cartografadas nos 5 metros mais relevantes para a secção, procedendo conforme indicado na Tabela 4.3;
- 2) análise da regularidade e rugosidade da superfície de todas as descontinuidades cartografadas nos 10 metros mais relevantes para a secção, procedendo conforme indicado na Tabela 4.3;
- 3) análise da regularidade e rugosidade da superfície das descontinuidades consideradas em obra como as mais significativas para a secção estudada.

A análise referida nas alíneas 1) e 2) foi efetuada tendo o apoio da base de dados de todas as descontinuidades e suas características cartografadas nos seis túneis de adução, e consistiu na contagem das descontinuidades de acordo com a sua regularidade/rugosidade, associados a um valor de J_r de acordo com as tabelas de campo utilizados na obra e demonstradas no anexo B, Figura B4. A análise referida na alínea 3) utilizou os dados da “Síntese Estrutural” que era registada em cada

cartografia geológico-geotécnica de frente de obra caracterizando as três famílias de descontinuidades mais importantes nessa frente.

A transformação de valores de regularidade – IR, ON, PL – e rugosidade – RG, LI, ES – registados nas descontinuidades em campo, em valores de parâmetro J_r - 0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4 – para cálculo do Q-Barton, seguiu as equivalências constantes de tabelas publicadas (Barton & Bieniawski, 2008) [24]

Para melhor entender do leitor na Tabela 4.8 exemplifica-se o procedimento seguido para a secção de avanço 0+871,70 a 0+875,60 do túnel de adução 1.

Tabela 4.8 - Exemplificação do procedimento tomado na obtenção do parâmetro J_r (0+871,70 a 0+875,60)

TA01 avanço 0+871,70 a 0+875,60					
Características das Descontinuidades			Contagem das Descontinuidades (número)		
Regularidade da superfície	Rugosidade da superfície	J_r	Mais significativas em obra (0+871,70 a 0+875,60)	5m mais relevantes (0+870,0 a 0+875,0)	10m mais relevantes (0+870,0 a 0+880,0)
Irregular ou em patamares (IR)	Rugosa (RG)	4			
	Lisa (LI)	3			
	Espelhada (ES)	2			
Ondulada (ON)	Rugosa (RG)	3	1	5	6
	Lisa (LI)	2			
	Espelhada (ES)	1,5			
Planar (PL)	Rugosa (RG)	1,5	2	5	10
	Lisa (LI)	1			
	Espelhada (ES)	0,5			
Valor médio			2	2,25	2,06

Na obtenção do valor de J_r foram utilizados os valores médios do parâmetro de rugosidade associados a cada um dos três critérios descritos, obtendo desta maneira três valores deste parâmetro representativos para cada uma das quarenta e oito secções estudadas.

Na Tabela 4.9 apresenta-se os valores de J_r obtidos da forma descrita em cima, e os valores de J_r estimados e adotados em obra para os quarenta e oito avanços estudados.

Tabela 4.9 - Valores do parâmetro J_r considerados neste estudo

Frente	Progressiva	J_r estimado	J_r calculado (valor médio)		
		J_r (obra)	Descontinuidades mais significativas	5m mais relevantes	10m mais relevantes
TA 1B	0+871.70 a 0+875.60	1,5	2,00	2,25	2,06
TA 1B	0+961.90 a 0+966.10	1	1,00	1,00	1,33
TA 1B	1+285.50 a 1+288.30	1,5	2,00	1,50	1,50
TA 1B	1+370.70 a 1+373.80	1,5	1,50	1,77	1,82
TA 1B	1+384.80 a 1+388.50	1,5	2,00	1,71	1,67
TA 1C	0+825.00 a 0+831.00	1,5	2,00	1,94	1,79
TA 2B	1+006.80 a 1+010.90	1,5	1,50	1,50	1,63
TA 2B	1+329.40 a 1+331.50	1,5	1,50	N/A	1,50
TA 2B	1+412.70 a 1+416.60	1,5	1,63	2,00	1,92
TA 2C	0+342.00 a 0+348.00	1,5	2,00	2,67	2,30
TA 2C	0+342.00 a 0+348.00	1,5	2,00	1,75	2,30
TA 2C	0+501.50 a 0+506.00	1,5	2,00	2,50	2,18
TA 2C	0+881.50 a 0+885.50	3	2,63	2,79	2,81
TA 3B	1+361.70 a 1+365.90	1,5	1,88	1,50	1,50
TA 3B	1+406.10 a 1+410.50	1,5	1,50	1,50	1,50
TA 3B	1+117.80 a 1+121.10	1,5	1,70	1,75	1,67
TA 3C	0+692.00 a 0+698.00	1,5	1,50	1,60	1,55
TA 3C	0+692.00 a 0+698.00	1,5	1,50	1,50	1,55
TA 3C	0+804.00 a 0+810.00	1,5	1,63	1,50	1,68
TA 3C	0+904.50 a 0+910.50	1,5	2,63	2,73	2,45
TA 4B	1+005.60 a 1+008.90	1,5	1,50	1,88	1,77
TA 4B	1+030.70 a 1+034.80	1,5	1,50	1,50	1,77
TA 4B	1+113.30 a 1+117.40	1,5	3,00	1,50	1,93
TA 4B	1+201.30 a 1+205.40	1,5	1,50	1,88	1,65
TA 4B	1+320.20 a 1+323.40	1	1,25	1,50	1,60
TA 4B	1+327.20 a 1+330.40	1	1,50	1,64	1,46
TA 4B	1+399.20 a 1+403.10	1,5	2,00	2,31	2,15
TA 4B	1+423.40 a 1+427.30	1,5	1,50	1,73	1,93
TA 4B	1+439.80 a 1+444.50	1,5	1,88	2,14	1,80
TA 4B	1+587.40 a 1+591.30	2	1,67	2,19	2,19
TA 4C	0+751.50 a 0+757.00	1,5	1,88	2,17	1,88
TA 4C	0+757.00 a 0+763.50	1,5	1,38	2,02	1,89
TA 4C	0+770.50 a 0+776.00	1,5	1,50	1,50	1,77
TA 4C	0+867.00 a 0+872.50	1,5	1,50	1,50	1,59
TA 4C	0+988.00 a 0+994.00	1,5	2,00	2,44	2,07
TA 5B	0+907.60 a 0+912.00	2	2,75	2,50	2,50
TA 5B	0+927.70 a 0+930.90	1,5	1,50	2,25	1,75
TA 5B	0+930.90 a 0+934.70	1,5	1,38	1,25	1,63
TA 5B	1+142.80 a 1+147.10	1,5	1,50	1,50	1,50
TA 5B	1+304.50 a 1+308.80	1,5	1,88	1,40	1,44
TA 5B	1+345.20 a 1+349.20	1,5	1,88	1,75	1,89
TA 5B	1+361.70 a 1+365.30	1,5	2,25	3,00	2,00
TA 5C	0+480.00 a 0+486.00	1,5	1,67	1,50	2,05
TA 5C	0+564.00 a 0+569.50	1,5	1,80	2,14	1,92
TA 5C	0+790.00 a 0+796.00	1,5	1,88	1,80	1,75
TA 5C	0+850.00 a 0+855.50	1,5	2,38	2,38	2,06
TA 5C	0+866.50 a 0+872.50	1,5	1,88	1,75	1,50
TA 6B	1+094.40 a 1+099.10	1,5	1,70	1,50	1,50
TA 6C	0+701.50 a 0+707.00	1,5	2,00	2,11	2,11
TA 6C	0+822.50 a 0+829.00	1,5	1,60	1,78	1,73

Como se pode reparar na Tabela 4.9 e graficamente na Figura 4.11, o parâmetro J_r adotado em obra tende a ser constante de valor 1,5 (categoria D ou E da Tabela 2.7). Como se pode aferir nessa mesma figura, os valores do parâmetro de rugosidade obtidos a partir das características da superfície das descontinuidades cartografadas são na sua grande maioria (cerca de 69%) superiores ao valor de $J_r = 1.5$, o que mais uma vez sugere uma tendência conservativa na avaliação deste parâmetro em obra.

A análise comparativa dos três critérios de cálculo do J_r em gabinete indica que a utilização das descontinuidades da síntese estrutural (critério 1) concentra os valores no intervalo $J_r = 1.5$ a 2 enquanto os critérios 2 e 3 – estatística das descontinuidades registadas em 5 e 10m de frente de escavação – apresentam uma distribuição mais alargada com valores no intervalo $J_r = 1.5$ a 2.5. O critério 3 apresenta uma distribuição normal com a classe central no intervalo de $J_r = 1.5 - 2$.

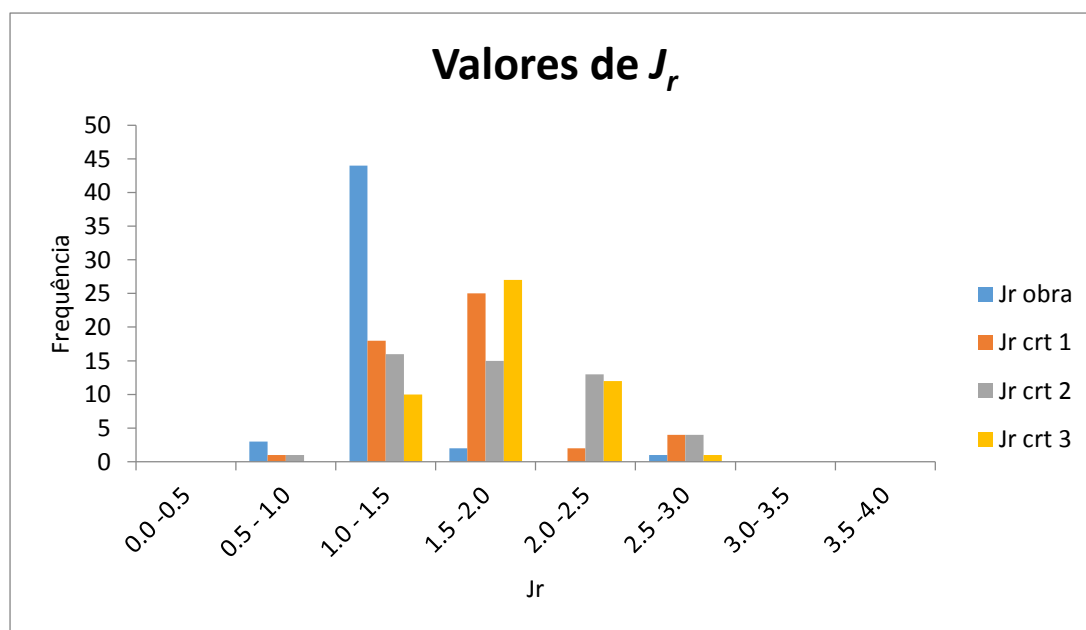


Fig. 4.11 – Histograma com os valores de J_r determinados em obra e calculados por três critérios alternativos

4.3.4. OBTENÇÃO DO PARÂMETRO J_a

O parâmetro J_a inclui o grau de alteração das paredes das descontinuidades no sistema de Q - Barton, penalizando ou favorecendo o índice Q consoante o estado da superfície, a abertura, espessura e rugosidade das descontinuidades, assim como as características do material de preenchimento caso exista. Este parâmetro é, no entanto, de difícil definição em campo suscitando por vezes dúvidas na atribuição de um valor que defina de facto o estado de alteração das descontinuidades.

Para quantificar este parâmetro de uma forma objetiva, procedeu-se à análise do tipo de contacto (p) e abertura (E) das paredes das descontinuidades, assim como a sua alteração (a) caracterizados na frente de obra segundo os quadros disponibilizados nas Figuras B5 a B7 do anexo B respetivamente. Esta análise, tal como no parâmetro J_r , consistiu na contagem de todas as descontinuidades cartografadas

e suas características nos 5 metros e 10 metros mais relevantes para cada secção, e das discontinuidades consideradas na obra as mais significativas de cada secção estudada. Em síntese, foram três os critérios de cálculo do parâmetro J_a :

- 1) análise do tipo de contacto, alteração e abertura de todas as discontinuidades cartografadas nos 5 metros mais relevantes para a secção, procedendo conforme indicado na Tabela 4.3;
- 2) análise do tipo de contacto, alteração e abertura de todas as discontinuidades cartografadas nos 10 metros mais relevantes para a secção, procedendo conforme indicado na Tabela 4.3;
- 3) análise do tipo de contacto, alteração e abertura das discontinuidades consideradas em obra como as mais significativas para a secção estudada.

O facto de se analisar uma secção segundo três critérios de estudo de discontinuidades deve-se ao facto de todos os critérios serem representativos da secção em estudo, permitindo obter não um, mas três valores que caracterizam este parâmetro para cada secção, possibilitando visualizar os limites e variação deste valor em cada secção estudada.

Para conseguir transformar as características das discontinuidades – tipo de contacto (p0, p1, p2, p3, p4), abertura (E1, E2, E3, E4) e alteração (a1, a2, a3, a4, ox) – em valores de J_a – 0.75, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 8-12, 13-20 –, foi necessário estabelecer um conjunto de equivalências empíricas, tendo como base a Tabela 2.8 proposta por Barton (1974). Estas equivalências inéditas, desenvolvidas no âmbito deste estudo, estão sujeitas, necessariamente, a um processo contínuo de revisão. Na Tabela 4.10 apresentam-se os valores do parâmetro J_a correspondentes às características das discontinuidades (tipo de contacto (p) / abertura (E) / alteração (a) das fraturas).

Tabela 4.10 - Peso do parâmetro J_a relativamente às características das discontinuidades (tipo de contacto /abertura /alteração)

	J_a	Rugosidade / Tipo de descontinuidade	Tipo de contacto (p)	Abertura (E)	Alteração (a)
Paredes em contacto (só película)					
A	0,75		p0	E1	a1
B	1		p0	E1	a2, ox
C	2		p2	(E1) E2	a2 (a3)
D	3		p2	E2	a3
E	4		p2	E2	a4
Paredes em contacto c/ pequeno movimento (preenchimento fino)					
F	4		p1 (p2)	E2 (E3)	a3
G	6		p1	E2 (E3)	a2
H	8		p3	E2 (E3)	a3
J	8-12		p3	E2 (E3)	a4
Paredes sem contacto depois de movimento (preenchimento grosso)					
K	6	ES / Falha	p1/p3	E3	a2
L	8	ES / Falha	p1/p3	E3	a3
M	8-12	ES / Falha	p1/p3	E3	a4
N	10	ES / Falha	p3	E4	a2
O	13	ES / Falha	p3	E4	a3
P	13-20	ES / Falha	p3	E4	a4

De forma a demonstrar a metodologia seguida no cálculo do parâmetro J_a para as quarenta e oito secções de estudo, exemplifica-se na Tabela 4.11, o procedimento para a secção de avanço 0+871,70 a 0+875,60, pertencente ao túnel de adução 1 frente B.

Tabela 4.11 - Exemplificação do procedimento tomado na obtenção do parâmetro J_a (TA01B 0+871,70 a 0+875,60)

TA01B avanço 0+871,70 a 0+875,60							
Características das Descontinuidades					Contagem das Descontinuidades (número)		
Rugosidade / Tipo de descontinuidade	Tipo de contacto (p)	Abertura (E)	Alteração (a)	J_a	Mais significativas (0+871,70 a 0+875,60)	5m mais relevantes (0+870,0 a 0+875,0)	10m mais relevantes (0+870,0 a 0+880,0)
Paredes em contacto (só película)							
	p0	E1	a1	0,75	1	10	15
	p0	E1	a2, ox	1	1		
	p2	(E1) E2	a2 (a3)	2	1		
	p2	E2	a3	3			
	p2	E2	a4	4			
Paredes em contacto c/ pequeno movimento (preenchimento fino)							
	p1 (p2)	E2 (E3)	a3	4			
	p1	E2 (E3)	a2	6			
	p3	E2 (E3)	a3	8			
	p3	E2 (E3)	a4	8-12			
Paredes sem contacto depois de movimento (preenchimento grosso)							
ES / Falha	p1/p3	E3	a2	6			
ES / Falha	p1/p3	E3	a3	8			
ES / Falha	p1/p3	E3	a4	8-12			
ES / Falha	p3	E4	a2	10			
ES / Falha	p3	E4	a3	13			
ES / Falha	p3	E4	a4	13-20			
Valor médio					1,25	0,75	0,75

Apresenta-se na Tabela 4.12 os valores médios obtidos a partir do procedimento acima descrito para as quarenta e oito secções estudadas, assim como os valores adotados para o parâmetro J_a estimados em obra.

Tabela 4.12 - Valores de J_a obtidos para os 48 avanços estudados

Frente	Progressiva	J_a estimado	J_a calculado (valor médio)		
		J_a (obra)	Descontinuidades mais significativas	5m mais relevantes	10m mais relevantes
TA 1B	0+871.70 a 0+875.60	1	1,25	0,75	0,75
TA 1B	0+961.90 a 0+966.10	2	1,00	0,75	0,83
TA 1B	1+285.50 a 1+288.30	0,75	0,75	0,75	0,75
TA 1B	1+370.70 a 1+373.80	0,75	0,75	0,79	0,90
TA 1B	1+384.80 a 1+388.50	0,75	0,75	0,82	0,86
TA 1C	0+825.00 a 0+831.00	1	0,75	0,78	0,76
TA 2B	1+006.80 a 1+010.90	3	1,56	10,50	5,94
TA 2B	1+329.40 a 1+331.50	0,75	0,75	N/A	0,75
TA 2B	1+412.70 a 1+416.60	1	1,56	4,00	3,46
TA 2C	0+342.00 a 0+348.00	1	0,75	0,75	0,75
TA 2C	0+342.00 a 0+348.00	1	0,75	0,75	0,75
TA 2C	0+501.50 a 0+506.00	1	0,83	0,75	0,86
TA 2C	0+881.50 a 0+885.50	2	4,81	7,50	5,25
TA 3B	1+361.70 a 1+365.90	0,75	0,75	0,75	0,75
TA 3B	1+406.10 a 1+410.50	1	0,75	1,00	1,00
TA 3B	1+117.80 a 1+121.10	2	1,30	0,96	1,14
TA 3C	0+692.00 a 0+698.00	2	0,75	1,00	1,00
TA 3C	0+692.00 a 0+698.00	2	0,75	1,00	1,00
TA 3C	0+804.00 a 0+810.00	1	3,81	0,75	1,89
TA 3C	0+904.50 a 0+910.50	2	1,19	1,14	2,61
TA 4B	1+005.60 a 1+008.90	1	0,75	0,81	0,80
TA 4B	1+030.70 a 1+034.80	1	0,75	0,75	0,75
TA 4B	1+113.30 a 1+117.40	1	0,75	0,75	0,75
TA 4B	1+201.30 a 1+205.40	1	0,75	0,88	0,83
TA 4B	1+320.20 a 1+323.40	3	2,83	1,58	2,83
TA 4B	1+327.20 a 1+330.40	4	3,29	3,46	3,65
TA 4B	1+399.20 a 1+403.10	3	2,40	2,22	2,17
TA 4B	1+423.40 a 1+427.30	2	1,00	1,09	1,05
TA 4B	1+439.80 a 1+444.50	2	1,00	1,00	1,00
TA 4B	1+587.40 a 1+591.30	4	2,00	1,75	1,75
TA 4C	0+751.50 a 0+757.00	2	3,69	4,97	4,09
TA 4C	0+757.00 a 0+763.50	2	4,00	2,14	2,63
TA 4C	0+770.50 a 0+776.00	2	1,92	1,11	1,11
TA 4C	0+867.00 a 0+872.50	2	1,00	1,71	2,64
TA 4C	0+988.00 a 0+994.00	1	1,67	0,94	0,86
TA 5B	0+907.60 a 0+912.00	3	1,13	4,00	2,75
TA 5B	0+927.70 a 0+930.90	2	2,10	5,00	4,50
TA 5B	0+930.90 a 0+934.70	2	1,19	4,00	2,59
TA 5B	1+142.80 a 1+147.10	0,75	0,75	0,75	0,75
TA 5B	1+304.50 a 1+308.80	2	3,06	0,75	0,86
TA 5B	1+345.20 a 1+349.20	2	1,75	1,00	1,00
TA 5B	1+361.70 a 1+365.30	2	3,75	4,00	1,25
TA 5C	0+480.00 a 0+486.00	1	0,75	0,75	0,75
TA 5C	0+564.00 a 0+569.50	2	3,80	4,21	4,57
TA 5C	0+790.00 a 0+796.00	1	1,17	0,88	0,97
TA 5C	0+850.00 a 0+855.50	3	3,50	3,50	4,11
TA 5C	0+866.50 a 0+872.50	4	3,75	4,69	3,59
TA 6B	1+094.40 a 1+099.10	2	5,65	6,88	3,91
TA 6C	0+701.50 a 0+707.00	1	0,75	0,75	0,77
TA 6C	0+822.50 a 0+829.00	1	4,55	2,59	3,09

Analisando a Tabela 4.12 e a Figura 4.12, verifica-se que mais de metade dos valores calculados do parâmetro J_a são inferiores aos valores adotados em obra (54,4%), sendo que 31,5% são superiores e apenas 14,1% iguais aos valores estimados em obra. Estando este parâmetro como denominador na expressão do cálculo do Q - Barton, valores superiores de J_a estão associados a valores inferiores de Q - Barton e vice-versa., o que mais uma vez sugere a tendência para um aumento do índice de qualidade do maciço Q - Barton relativamente ao valor adotado em obra.

Os valores de J_a calculados de acordo com os três critérios utilizados em gabinete apresentam um padrão de valores muito semelhante, com um máximo na classe mais baixa de $J_a = 0.75$ a $J_a = 1$, e uma assimetria à direita para valores maiores. Todos eles apresentam um pico secundário em classes de J_a superiores, havendo uma coincidência na classe de $J_a = 4 - 5$.

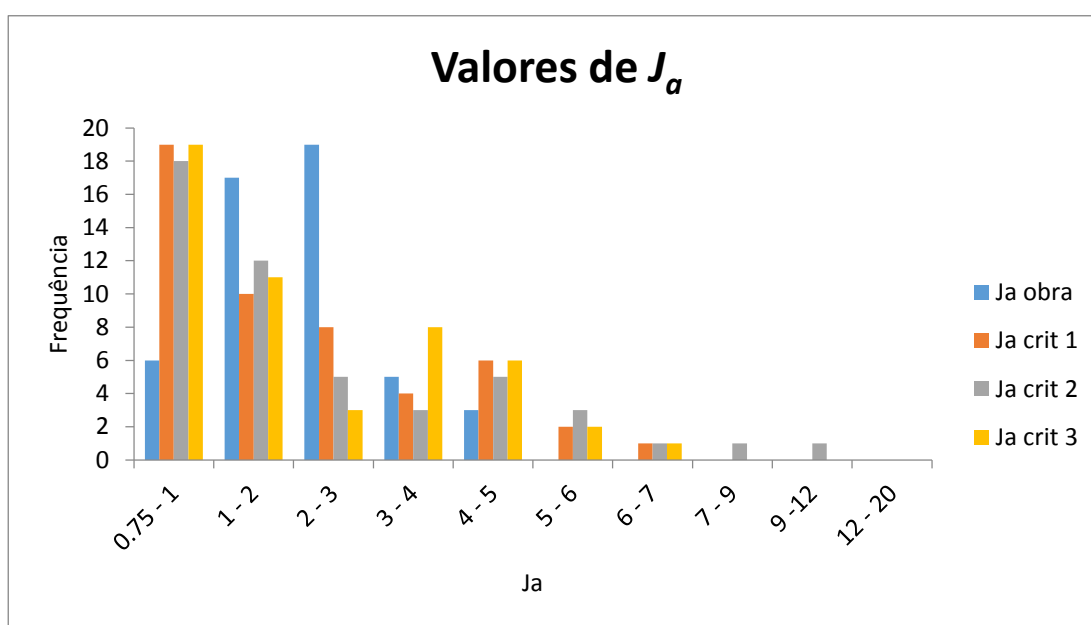


Fig. 4.12 - Histograma com os valores de J_a determinados em obra e calculados por três critérios alternativos

4.4. SÍNTESE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DE BARTON

Os quatro parâmetros estudados – RQD, J_n , J_r e J_a - foram classificados, cada um, segundo a mesma metodologia e critérios, de forma a não incluir julgamentos diferentes para o mesmo parâmetro e reduzir a dependência de fatores pessoais do observador na classificação destes.

De forma a verificar a influência que este tipo de análise teria na classificação do maciço de cada caso particular assim como, a nível global, o impacto associado aos custos de tratamento e prazos de execução, procedeu-se à combinação de todos os parâmetros de forma a obter uma gama de valores do índice Q - Barton representativos de cada caso estudado, comparáveis com o valor utilizado na classificação do maciço em obra.

Na Tabela 4.13 sintetiza-se, por secção, o número de valores obtidos para cada parâmetro assim como o número de valores do índice Q - Barton calculados pela combinação de todos os parâmetros através da equação de Barton (7).

Tabela 4.13 - Número de combinações do índice Q - Barton

Frente	Progressiva	Parâmetros calculados (número)						Q (número de combinações)
		RQD	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	
TA 1B	0+871.70 a 0+875.60	2	4	3	3	1	1	72
TA 1B	0+961.90 a 0+966.10	3	4	3	3	1	1	108
TA 1B	1+285.50 a 1+288.30	2	4	3	3	1	1	72
TA 1B	1+370.70 a 1+373.80	3	4	3	3	1	1	108
TA 1B	1+384.80 a 1+388.50	2	4	3	3	1	1	72
TA 1C	0+825.00 a 0+831.00	1	4	3	3	1	1	36
TA 2B	1+006.80 a 1+010.90	2	4	3	3	1	1	72
TA 2B	1+329.40 a 1+331.50	3	4	2	2	1	1	48
TA 2B	1+412.70 a 1+416.60	2	4	3	3	1	1	72
TA 2C	0+342.00 a 0+348.00	1	4	3	3	1	1	36
TA 2C	0+342.00 a 0+348.00	1	4	3	3	1	1	36
TA 2C	0+501.50 a 0+506.00	1	4	3	3	1	1	36
TA 2C	0+881.50 a 0+885.50	2	4	3	3	1	1	72
TA 3B	1+361.70 a 1+365.90	3	4	3	3	1	1	108
TA 3B	1+406.10 a 1+410.50	3	4	3	3	1	1	108
TA 3B	1+117.80 a 1+121.10	1	4	3	3	1	1	36
TA 3C	0+692.00 a 0+698.00	1	4	3	3	1	1	36
TA 3C	0+692.00 a 0+698.00	1	4	3	3	1	1	36
TA 3C	0+804.00 a 0+810.00	2	4	3	3	1	1	72
TA 3C	0+904.50 a 0+910.50	2	4	3	3	1	1	72
TA 4B	1+005.60 a 1+008.90	2	4	3	3	1	1	72
TA 4B	1+030.70 a 1+034.80	2	4	3	3	1	1	72
TA 4B	1+113.30 a 1+117.40	2	4	3	3	1	1	72
TA 4B	1+201.30 a 1+205.40	1	4	3	3	1	1	36
TA 4B	1+320.20 a 1+323.40	1	4	3	3	1	1	36
TA 4B	1+327.20 a 1+330.40	2	4	3	3	1	1	72
TA 4B	1+399.20 a 1+403.10	3	4	3	3	1	1	108
TA 4B	1+423.40 a 1+427.30	2	4	3	3	1	1	72
TA 4B	1+439.80 a 1+444.50	3	4	3	3	1	1	108
TA 4B	1+587.40 a 1+591.30	3	4	3	3	1	1	108
TA 4C	0+751.50 a 0+757.00	1	4	3	3	1	1	36
TA 4C	0+757.00 a 0+763.50	1	4	3	3	1	1	36
TA 4C	0+770.50 a 0+776.00	1	4	3	3	1	1	36
TA 4C	0+867.00 a 0+872.50	1	4	3	3	1	1	36
TA 4C	0+988.00 a 0+994.00	2	4	3	3	1	1	72
TA 5B	0+907.60 a 0+912.00	3	4	3	3	1	1	108
TA 5B	0+927.70 a 0+930.90	2	4	3	3	1	1	72
TA 5B	0+930.90 a 0+934.70	2	4	3	3	1	1	72
TA 5B	1+142.80 a 1+147.10	1	4	3	3	1	1	36
TA 5B	1+304.50 a 1+308.80	3	4	3	3	1	1	108
TA 5B	1+345.20 a 1+349.20	3	4	3	3	1	1	108
TA 5B	1+361.70 a 1+365.30	2	4	3	3	1	1	72
TA 5C	0+480.00 a 0+486.00	2	4	3	3	1	1	72
TA 5C	0+564.00 a 0+569.50	2	4	3	3	1	1	72
TA 5C	0+790.00 a 0+796.00	1	4	3	3	1	1	36
TA 5C	0+850.00 a 0+855.50	2	4	3	3	1	1	72
TA 5C	0+866.50 a 0+872.50	2	4	3	3	1	1	72
TA 6B	1+094.40 a 1+099.10	1	4	3	3	1	1	36
TA 6C	0+701.50 a 0+707.00	1	4	3	3	1	1	36
TA 6C	0+822.50 a 0+829.00	2	4	3	3	1	1	72

Para uma análise global de comparação dos valores do Q - Barton determinados em obra para as quarenta e oito secções seleccionadas para este estudo (Q - Barton obra) e os valores do Q - Barton calculados com base na determinação objetiva dos parâmetros RQD, J_n , J_r e J_a – usaram-se os valores de J_w e SRF de obra (Q - Barton calculado) – construiu-se o gráfico que se apresenta na Figura 4.13. Usaram-se 48 valores de Q – Barton de obra e 3252 valores de Q – Barton calculado, resultante de todas as combinações possíveis dos parâmetros determinados com base nos diferentes critérios que foram expostos neste capítulo.

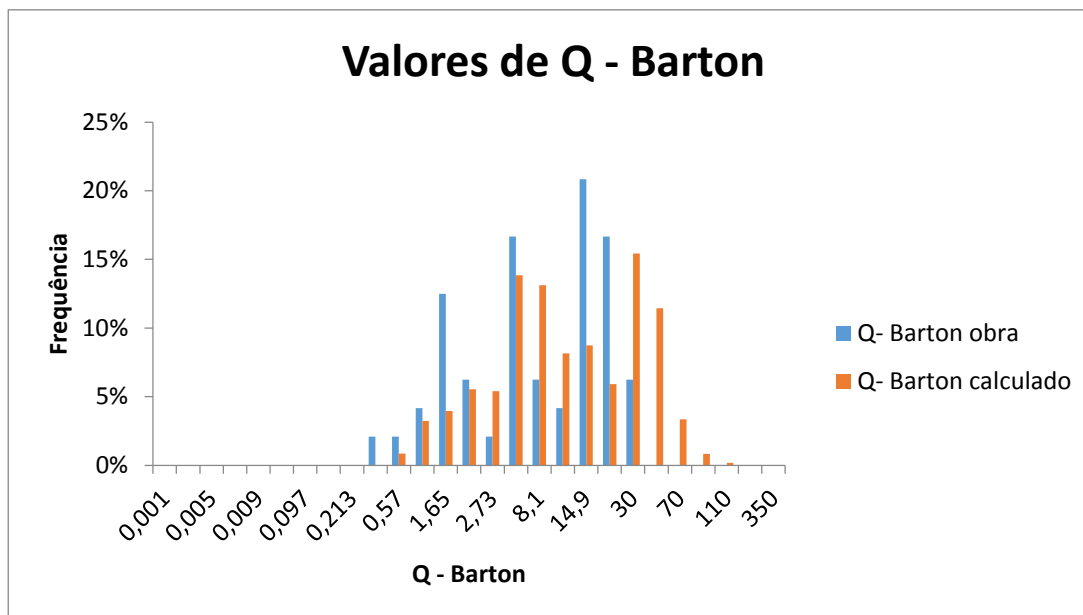


Fig. 4.13 – Histograma com os valores de Q- Barton determinados em obra e calculados por combinação de todos os critérios de determinação de RQD, J_n , J_r e J_a em gabinete

5

COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS VALORES DE Q - BARTON

5.1. INTRODUÇÃO

Nesta fase do trabalho os valores de Q - Barton calculados através da combinação de todos os parâmetros obtidos no capítulo anterior serão analisados e comparados, de forma particular, para cada uma das quarenta e oito secções estudadas, verificando o impacto que o tipo de parametrização efetuada teria em cada secção e na respetiva classificação geomecânica do maciço. Também serão analisados de uma forma global, em que se pretende quantificar os erros e incertezas associadas à parametrização da classificação de Barton, na forma de tempo e custos economizados relativos a uma obra genérica que fosse representada pelas características da amostragem utilizada neste trabalho.

5.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS CASOS DE ESTUDO

Devido à quantidade de valores do índice Q - Barton obtidos através das diferentes combinações de parâmetros, a informação é apresentada em forma de tabelas que sintetizam os dados, para as quarenta e oito secções estudadas, em intervalos de índice Q - Barton organizados por classe de maciço. Estes dados foram analisados estatisticamente recorrendo a gráficos de frequência construídos a partir dos pontos médios dos respetivos intervalos à escala logarítmica, tendo como ordenada as frequências relativas e acumuladas inerentes a cada intervalo. De forma a facilitar a compreensão do mesmo salientou-se a cor vermelha o valor de Q - Barton adotado em obra – “Q - Barton obra” que na legenda dos gráficos aparece como “Q. Geólogo” – e dividiu-se, a linha tracejada, os intervalos das cinco classes de maciço rochoso com os limites de valores de Q - Barton conforme foram definidos em projeto para os túneis de adução do circuito hidráulico (Figura 2.12).

Apresenta-se nas Figuras 5.1 a 5.50 os gráficos obtidos para todas as quarenta e oito secções que foram estudadas e, nas tabelas D1 a D50 presentes no anexo D, os respetivos dados estatísticos relativos aos valores do índice de qualidade Q - Barton obtidos a partir de todas as combinações dos seis parâmetros da classificação de Q - Barton.

Em cada um dos gráficos está representado:

- Em ordenadas: Frequência relativa e acumulada, em percentagem (0% a 100%)
- Em abcissas: Valores do Q - Barton de 0.001 a 260.
- Q.GEOLOGO: valor do Q - Barton determinado pelo geólogo na frente de obra com base no qual foi classificado o maciço rochoso e determinado o tratamento geotécnico a aplicar; para cada secção existe apenas um valor de Q - Barton;

- **FREQ.RELATIVA**: curva da frequência relativa dos valores do Q - Barton calculados, em gabinete no âmbito deste trabalho, com base nas combinações dos valores dos parâmetros RQD, J_n , J_r e J_a obtidos com a aplicação dos vários critérios expostos no Capítulo 4. Para cada secção existem um número de valores do Q - Barton resultantes das combinações dos parâmetros que, no máximo, é de 108 valores e, no mínimo, é de 36 valores (Tabela 4.13).
- **FREQ.ACUMULADA**: curva da frequência acumulada dos valores do Q - Barton calculados em gabinete no âmbito deste trabalho;
- **V IV III II I**: Classes de maciço rochoso com limites de valores de Q - Barton conforme foram definidos em Projeto;
- **(13%)**: valor da percentagem acumulada para cada limite de classe da curva cumulativa do Q - Barton calculado (no caso da TA01B 0+871.70 a 0+875.60, Figura 5.1, significa que 13% da amostra pertence à classe II e os restantes 87% à classe I).

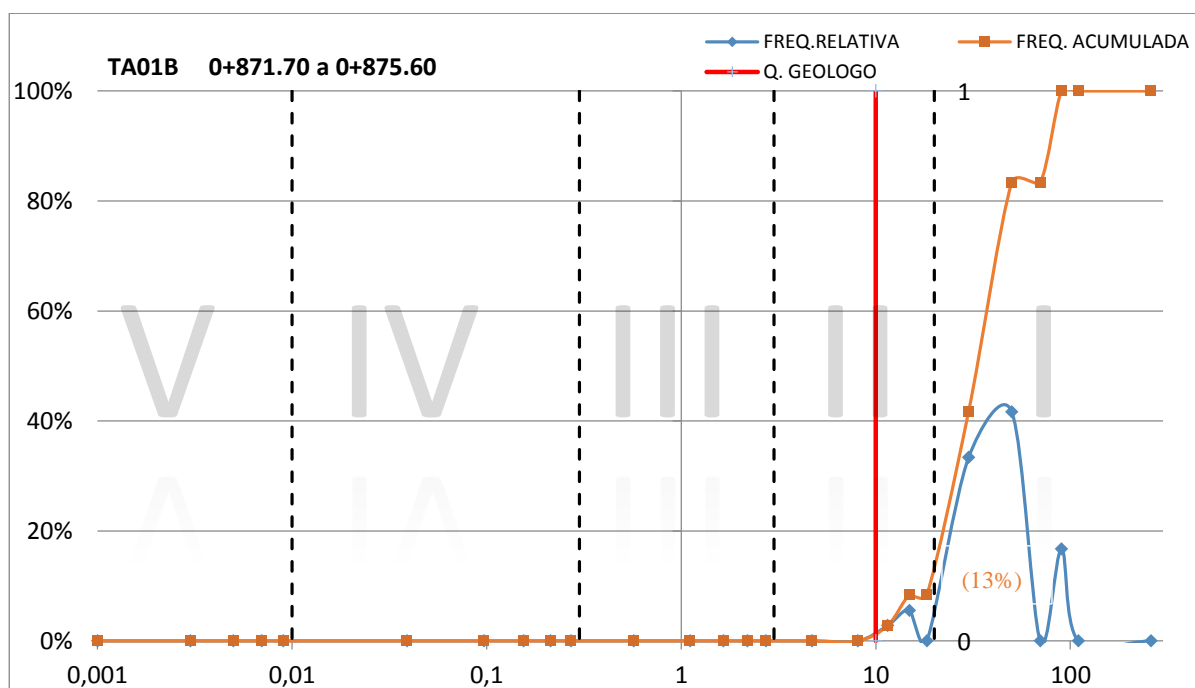


Fig. 5.1 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+871.70 a 0+875.60 pertencente ao túnel de adução 1 frente B

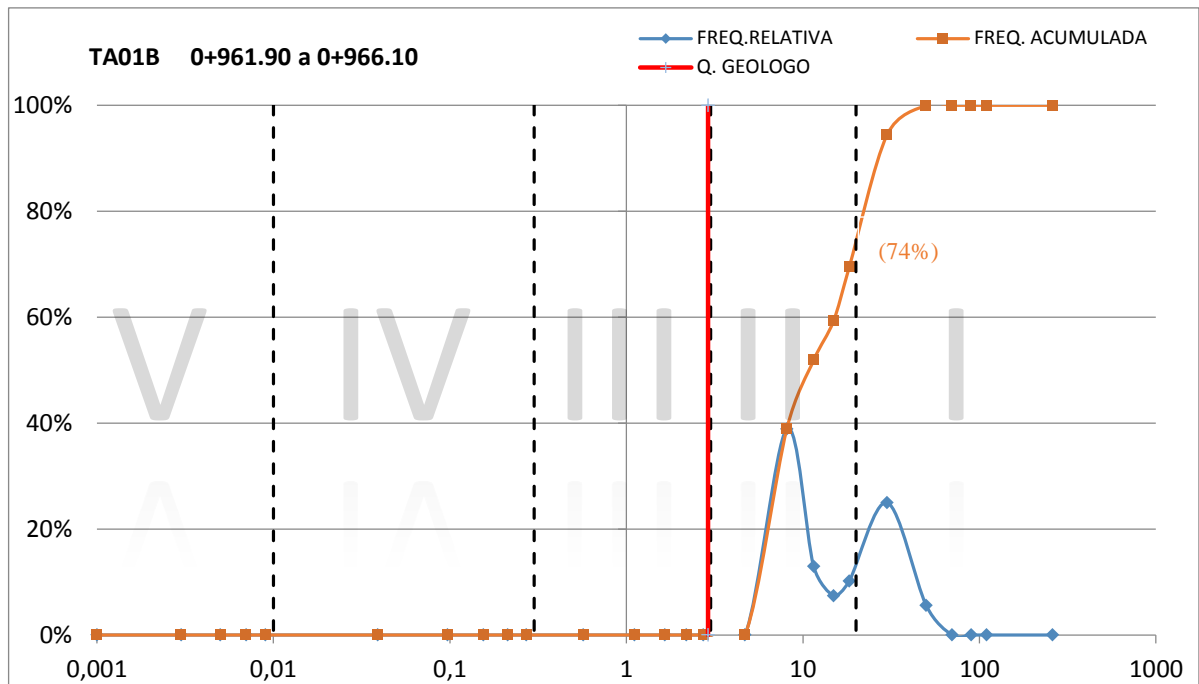


Fig. 5.2 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+961.90 a 0+966.10 pertencente ao túnel de adução 1 frente B

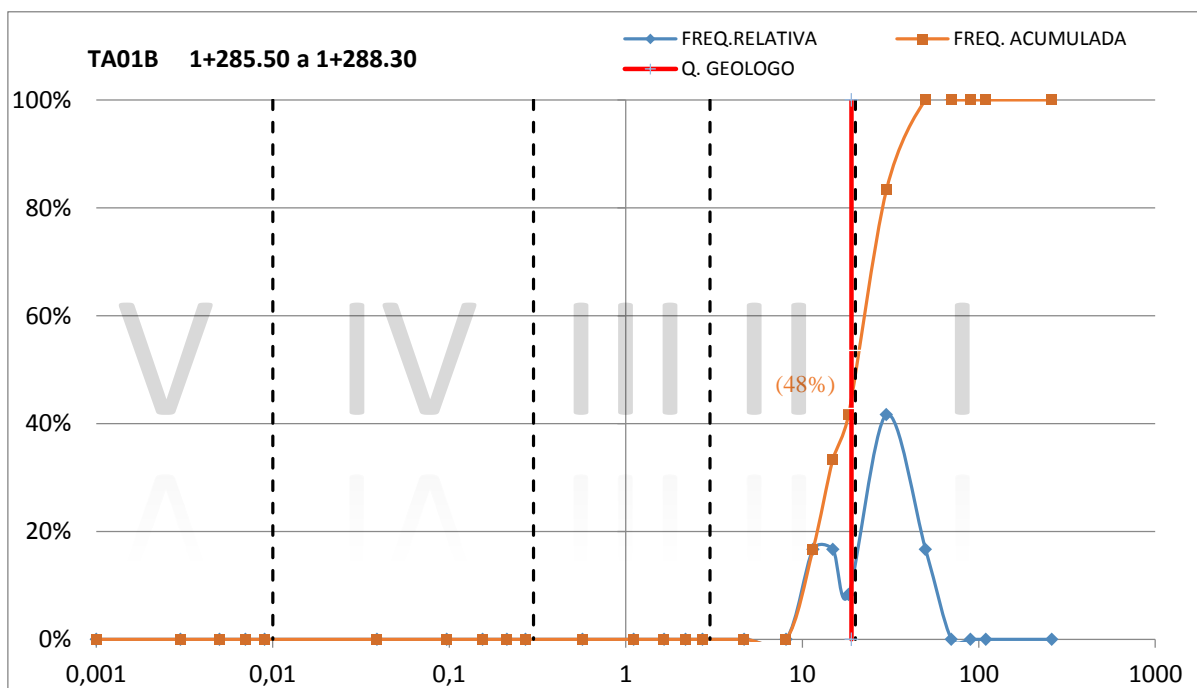


Fig. 5.3 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+285.50 a 1+288.30 pertencente ao túnel de adução 1 frente B

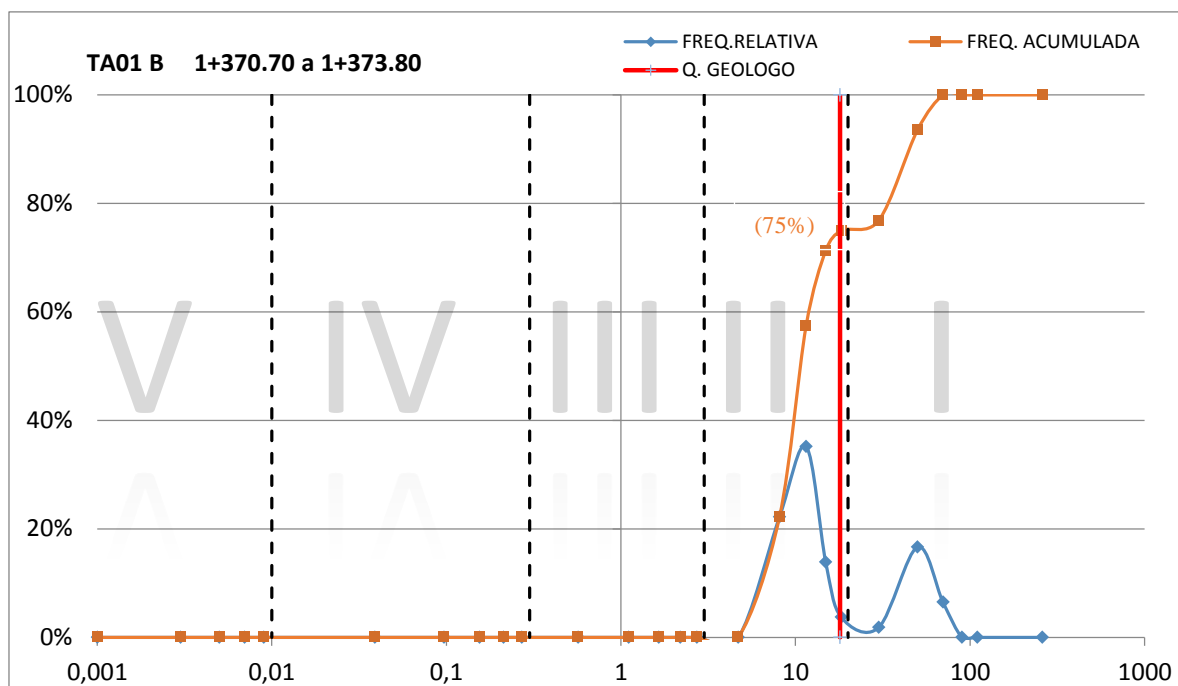


Fig. 5.4 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+370.70 a 1+373.80 pertencente ao túnel de adução 1 frente B

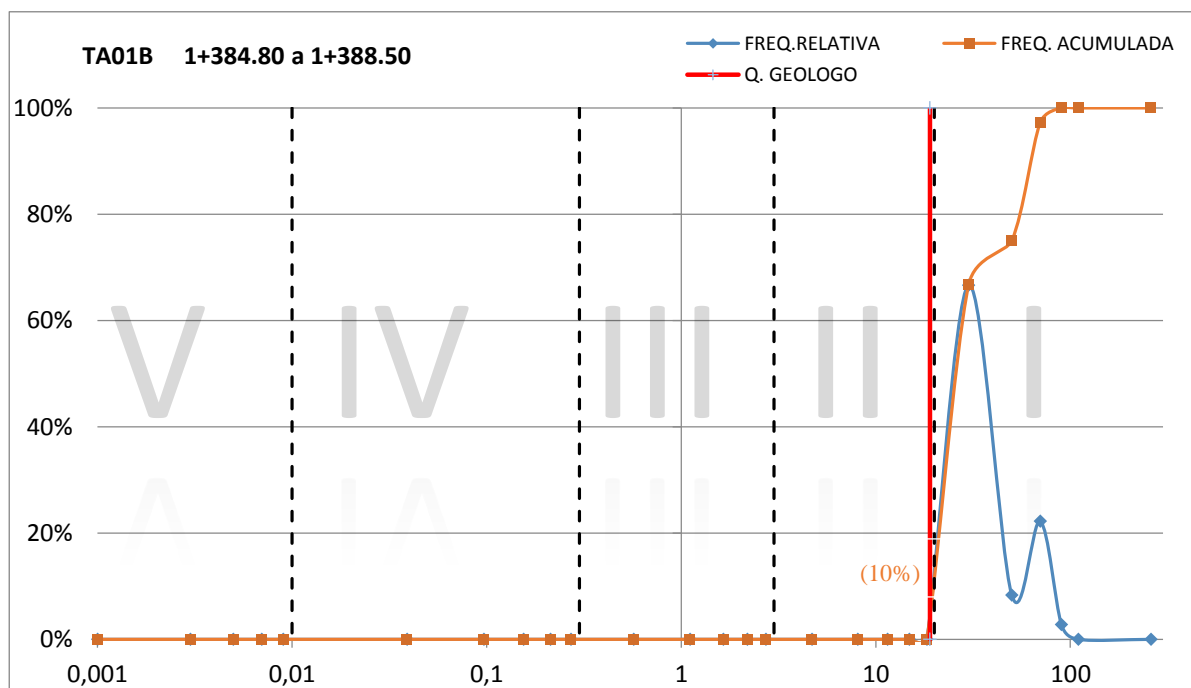


Fig. 5.5 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+384.80 a 1+388.50 pertencente ao túnel de adução 1 frente B

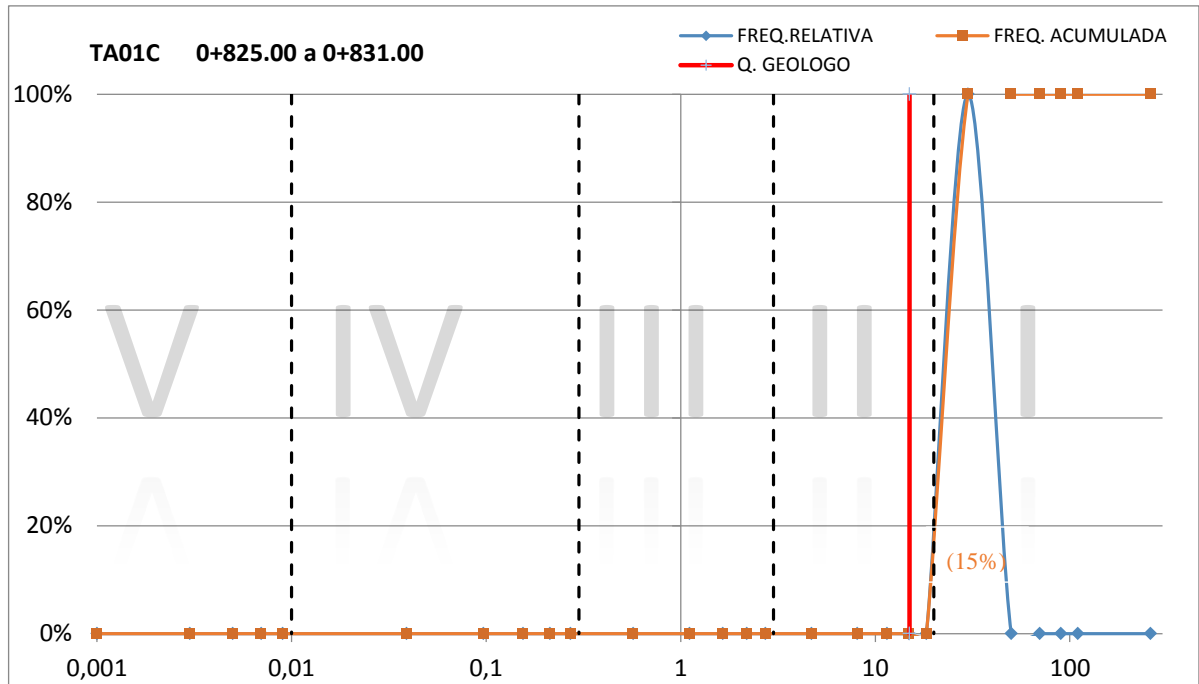


Fig. 5.6 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+825.00 a 0+831.00 pertencente ao túnel de adução 1 frente C

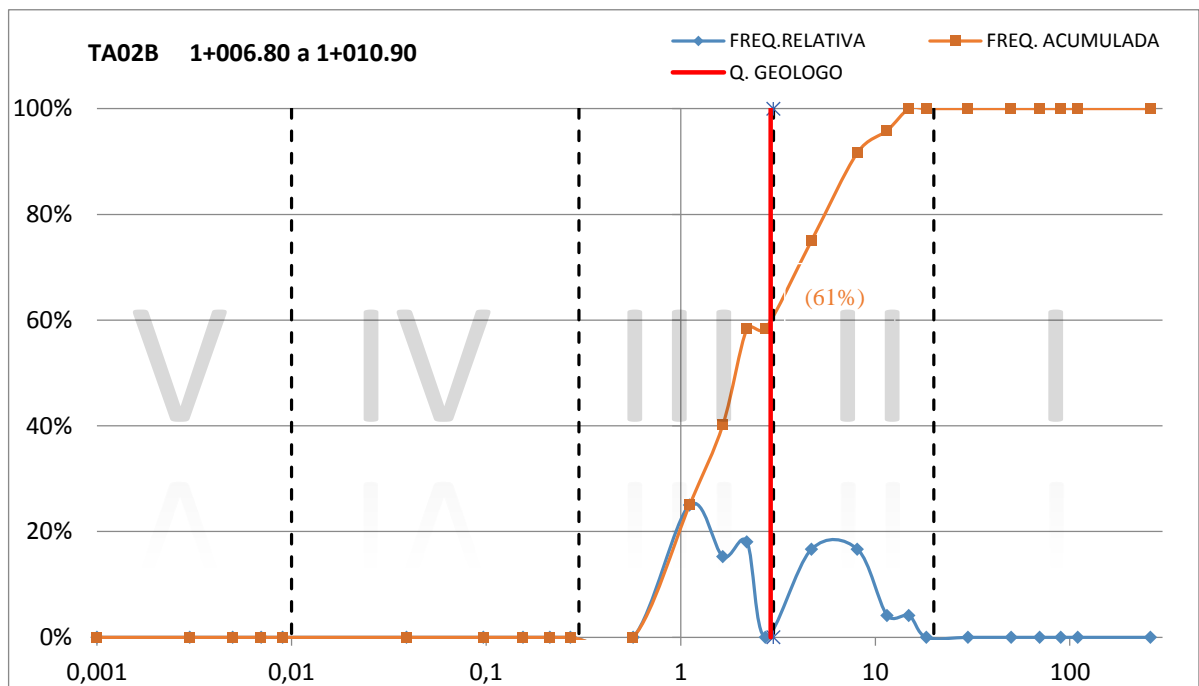


Fig. 5.7 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+006.80 a 1+010.90 pertencente ao túnel de adução 2 frente B

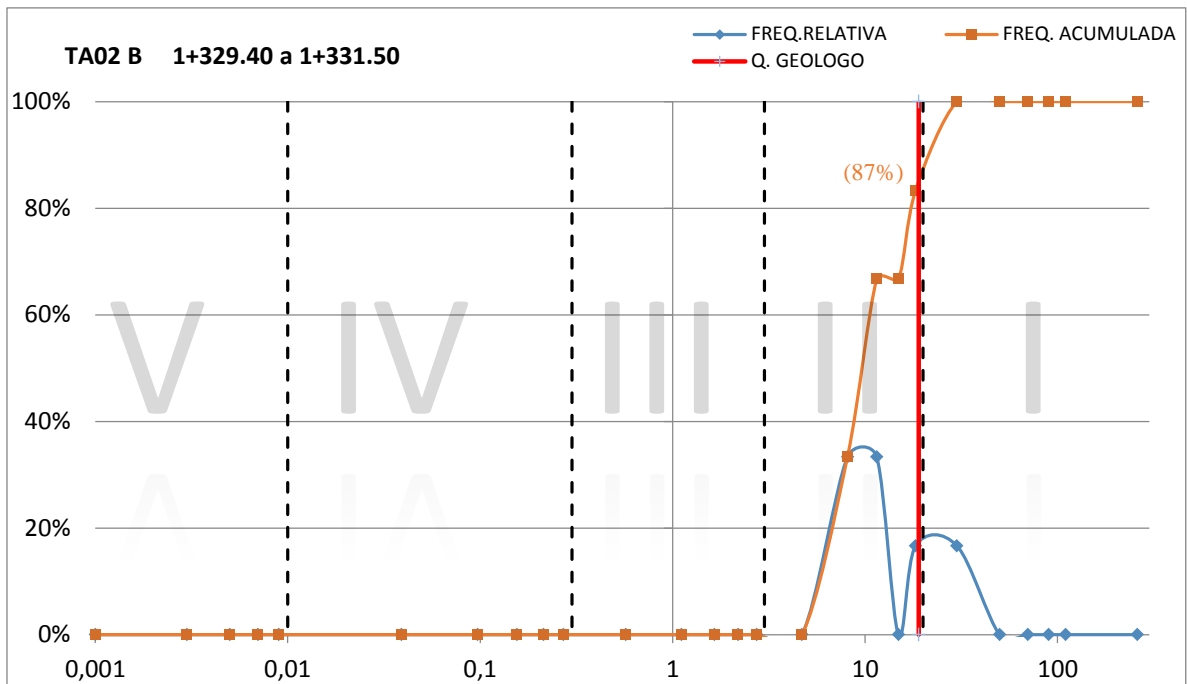


Fig. 5.8 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+329.40 a 1+331.50 pertencente ao túnel de adução 2 frente B

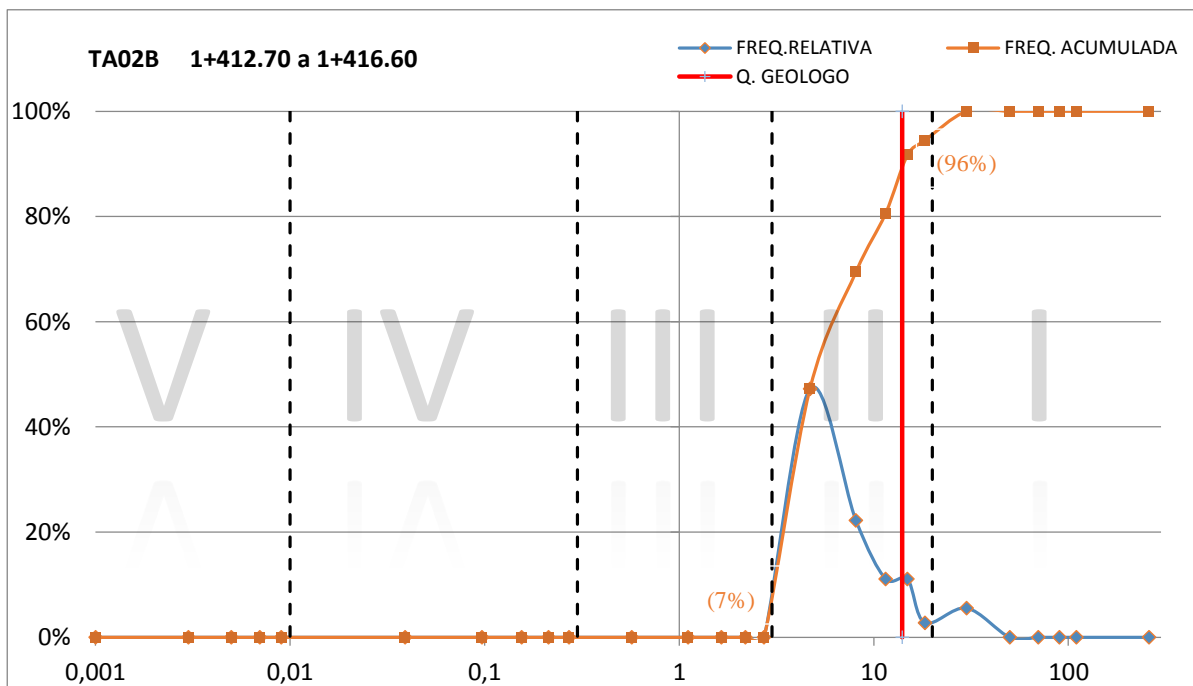


Fig. 5.9 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+412.70 a 1+416.60 pertencente ao túnel de adução 2 frente B

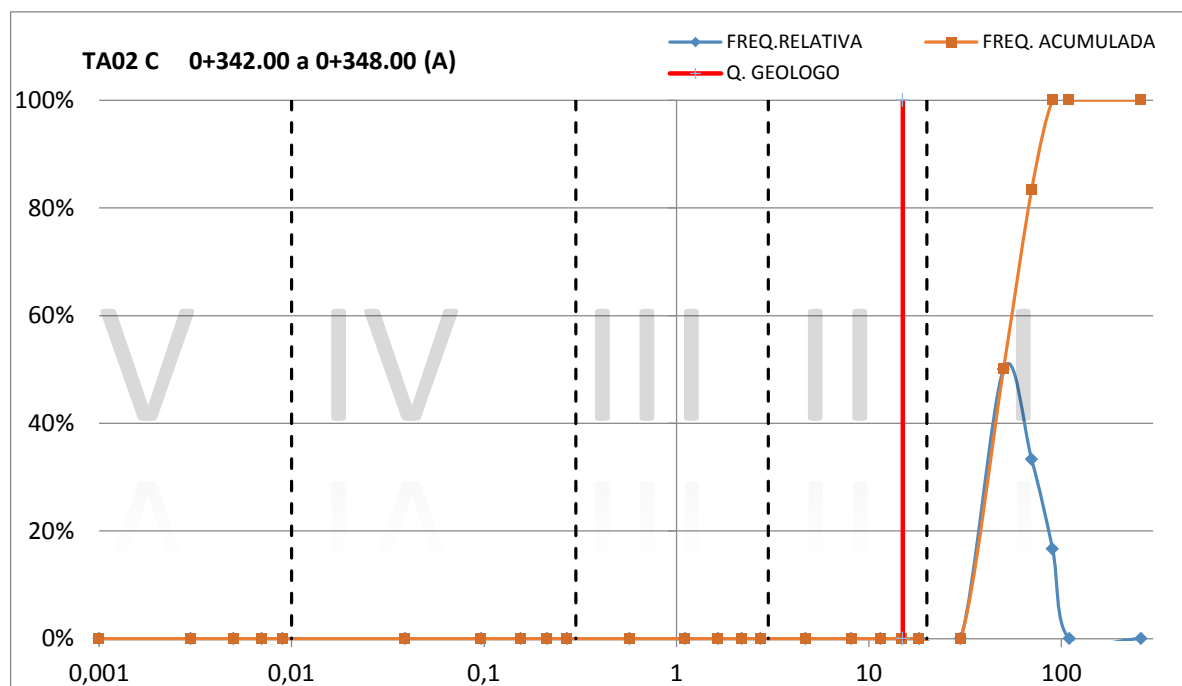


Fig. 5.10 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+342.00 a 0+348.00 (A) pertencente ao túnel de adução 2 frente C

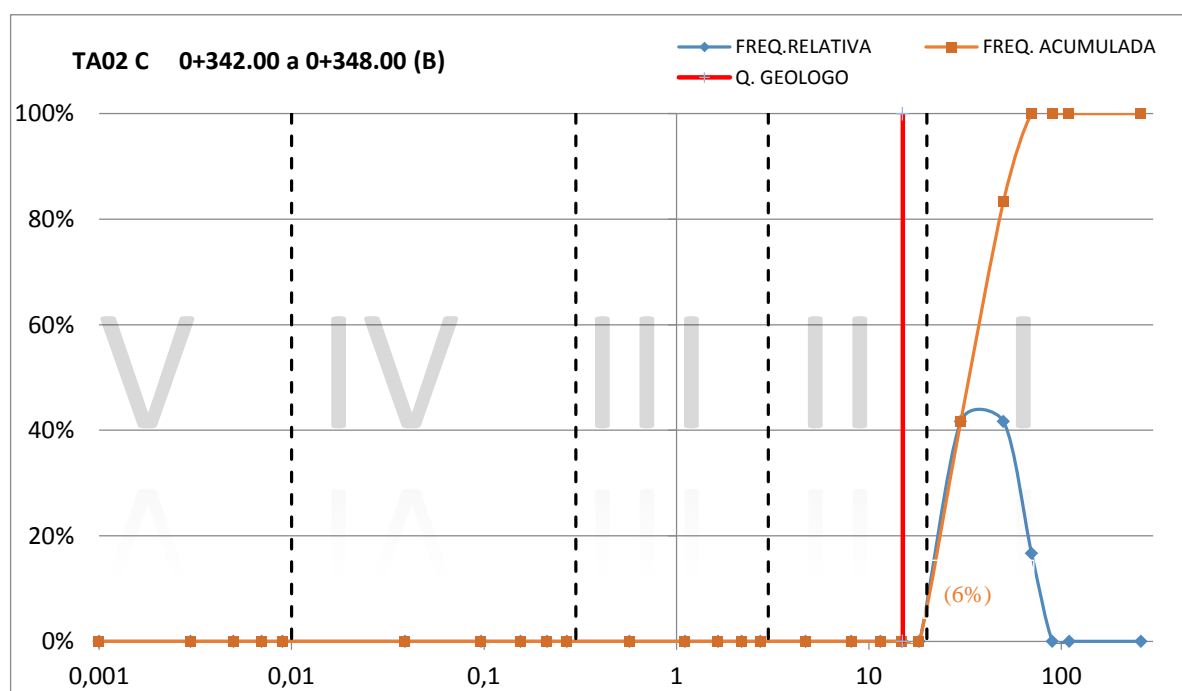


Fig. 5.11 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+342.00 a 0+348.00 (B) pertencente ao túnel de adução 2 frente C

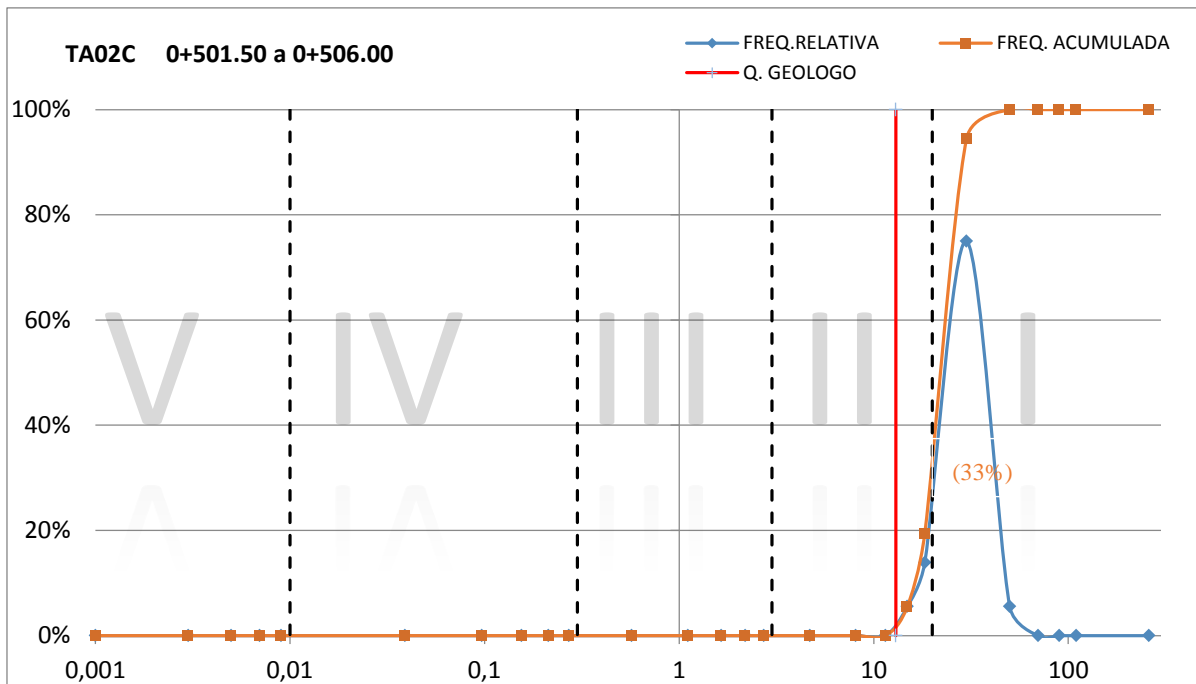


Fig. 5.12 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+501.50 a 0+506.00 pertencente ao túnel de adução 2 frente C

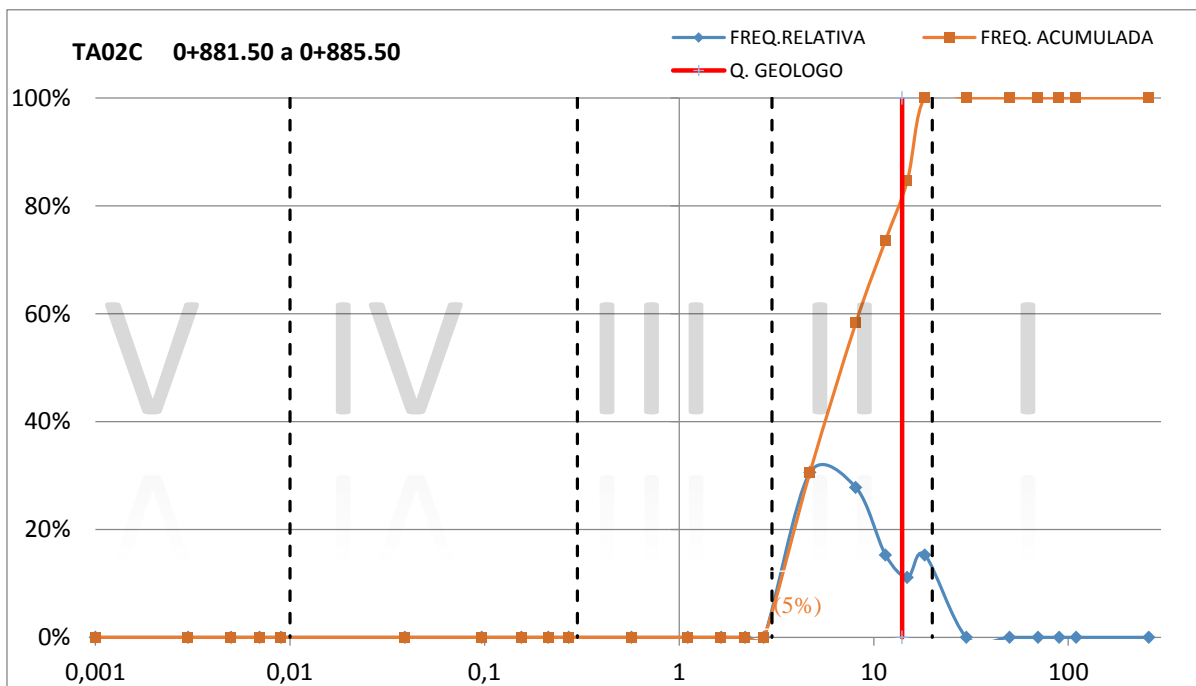


Fig. 5.13 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+881.50 a 0+885.50 pertencente ao túnel de adução 2 frente C

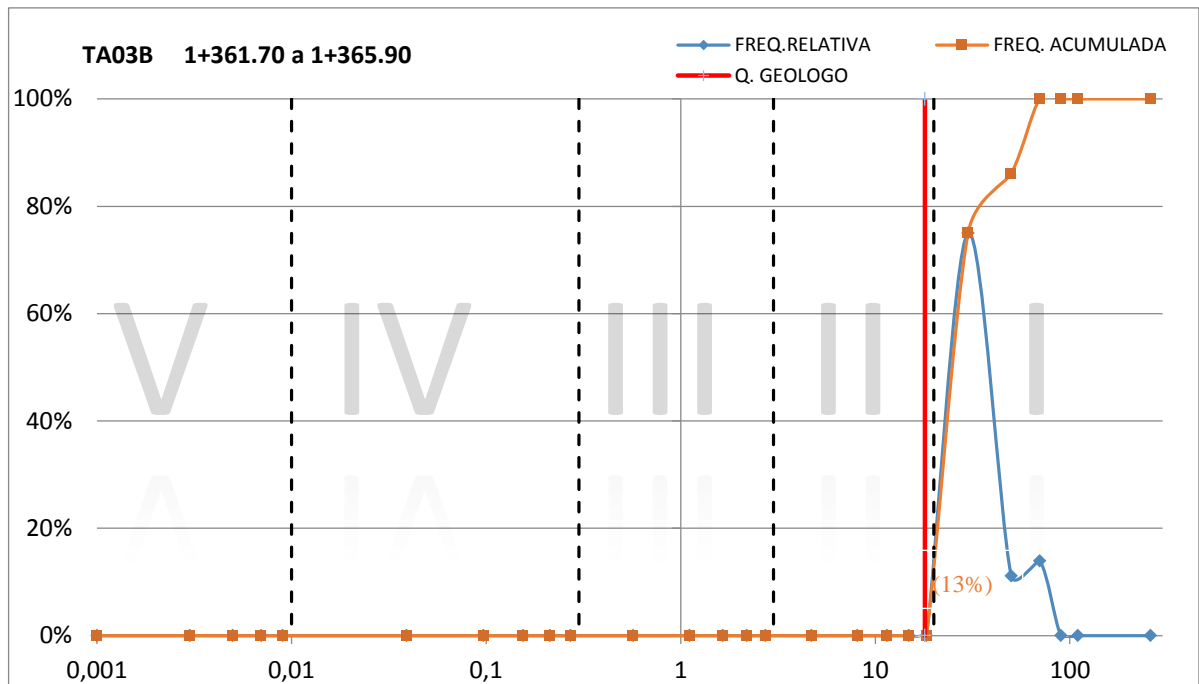


Fig. 5.14 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+361.70 a 1+365.90 pertencente ao túnel de adução 3 frente B

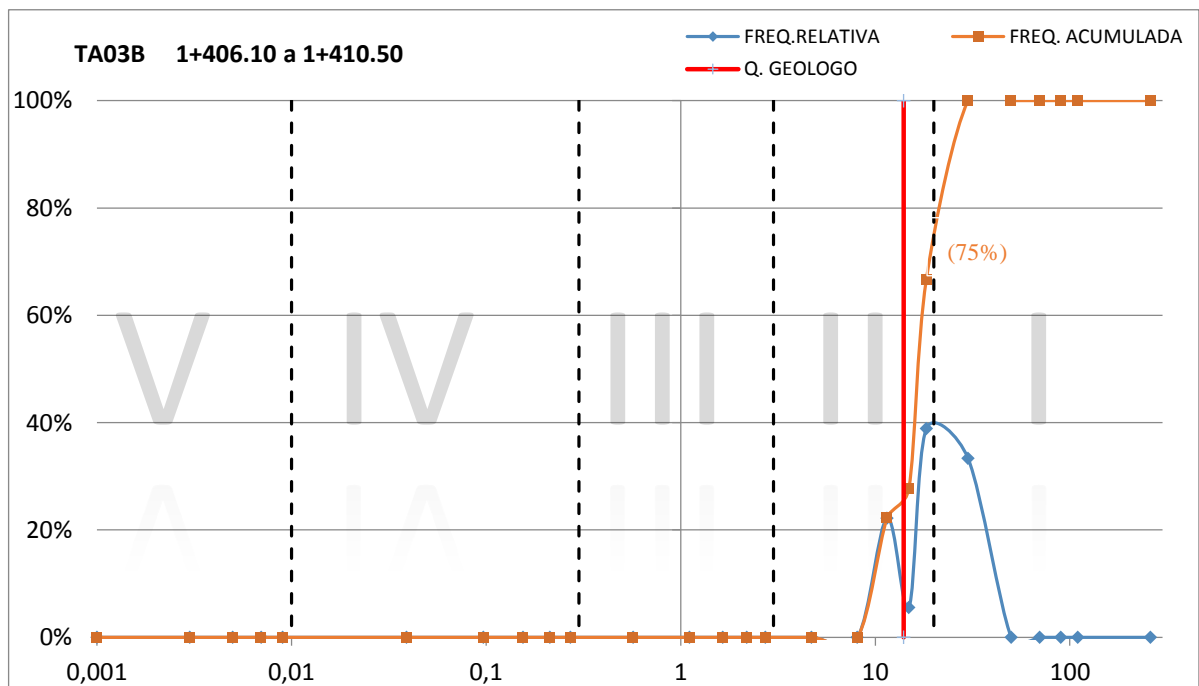


Fig. 5.15 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+406.10 a 1+410.50 pertencente ao túnel de adução 3 frente B

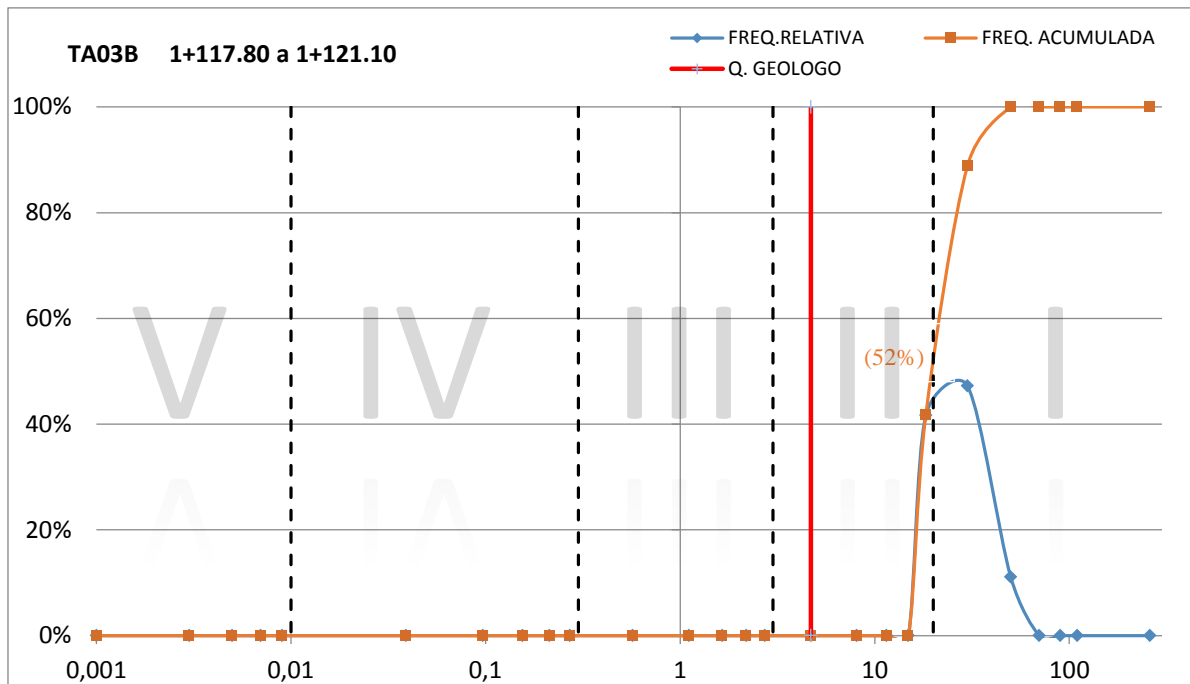


Fig. 5.16 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+117.80 a 1+121.10 pertencente ao túnel de adução 3 frente B

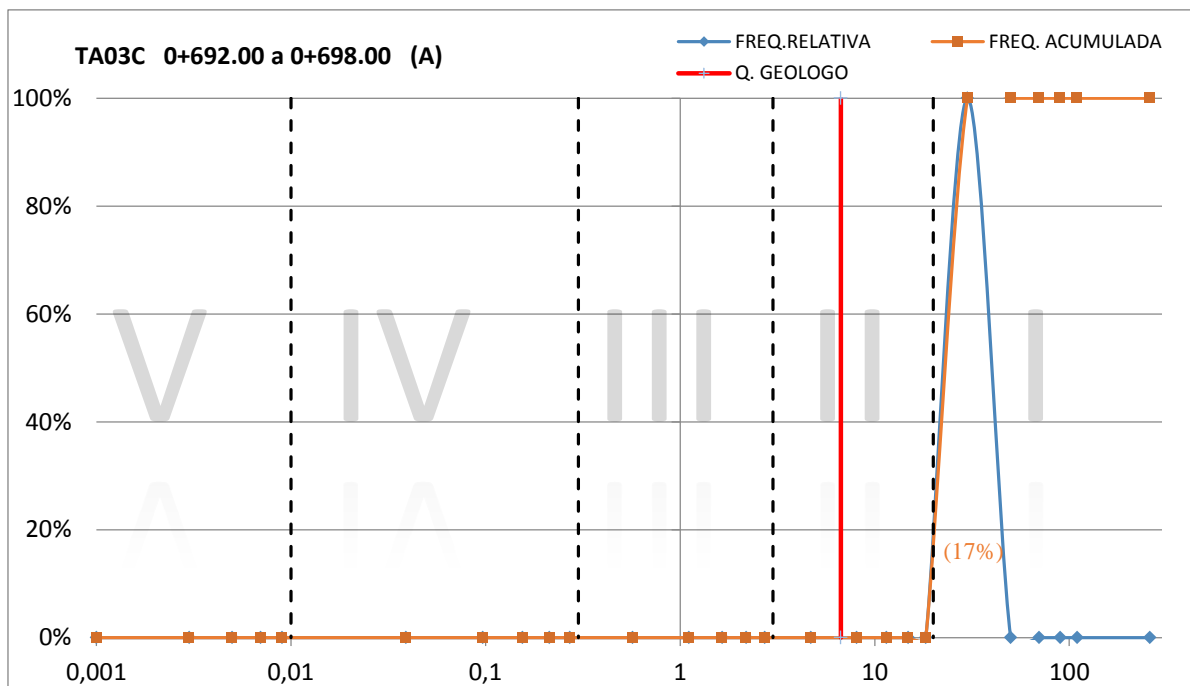


Fig. 5.17 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+692.00 a 0+698.00 (A) pertencente ao túnel de adução 3 frente C

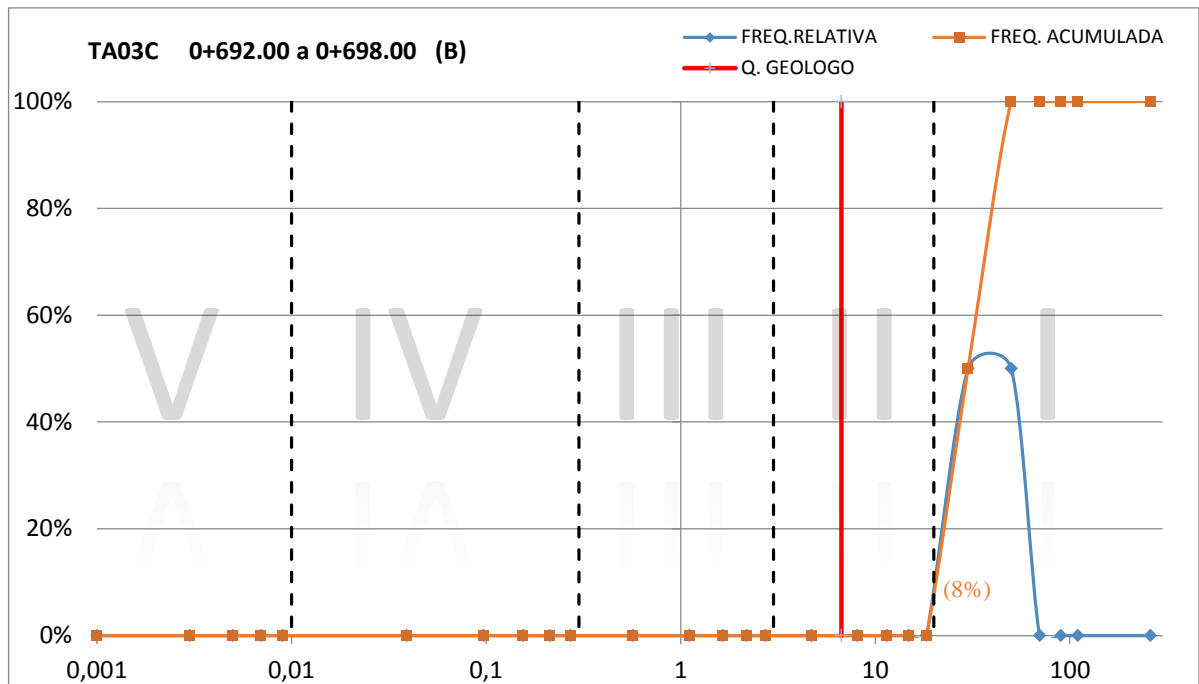


Fig. 5.18 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+692.00 a 0+698.00 (B) pertencente ao túnel de adução 3 frente C

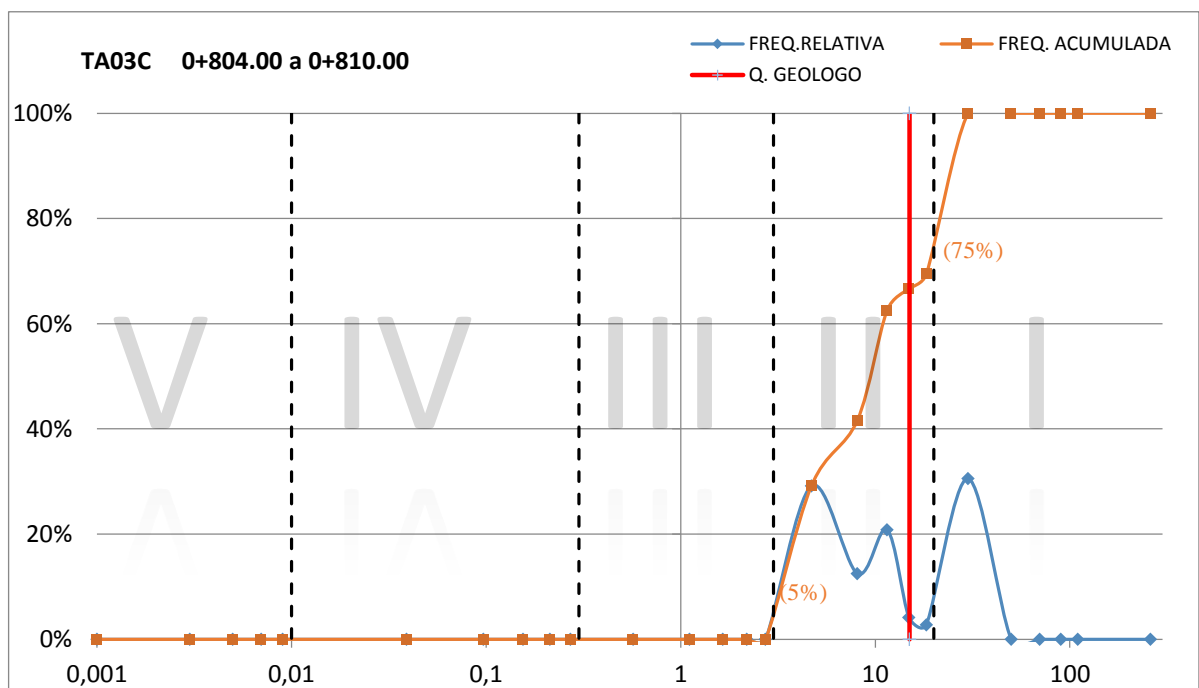


Fig. 5.19 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+804.00 a 0+810.00 pertencente ao túnel de adução 3 frente C

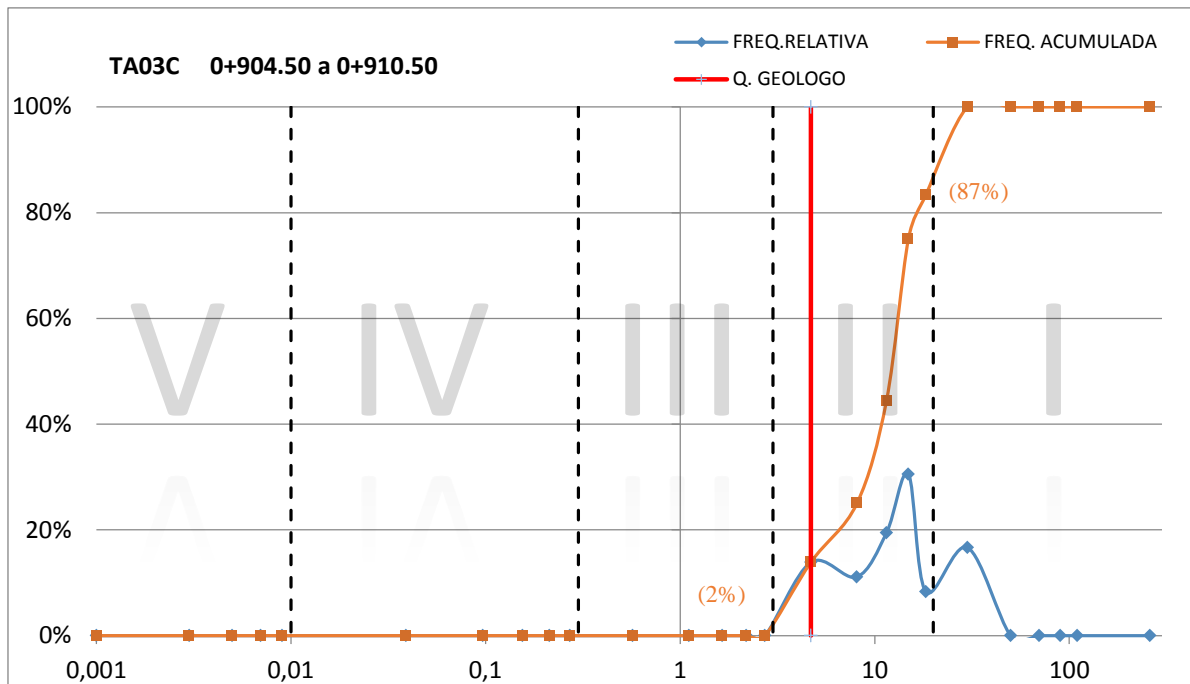


Fig. 5.20 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+904.50 a 0+910.50 pertencente ao túnel de adução 3 frente C

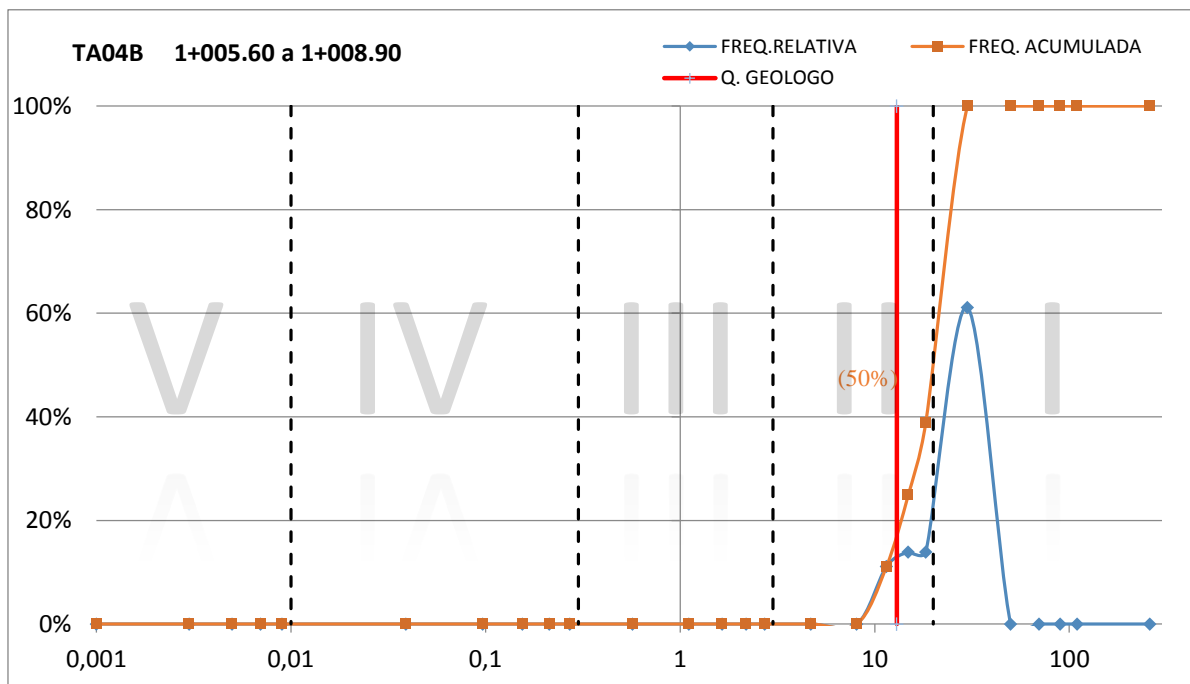


Fig. 5.21 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+005.60 a 1+008.90 pertencente ao túnel de adução 4 frente B

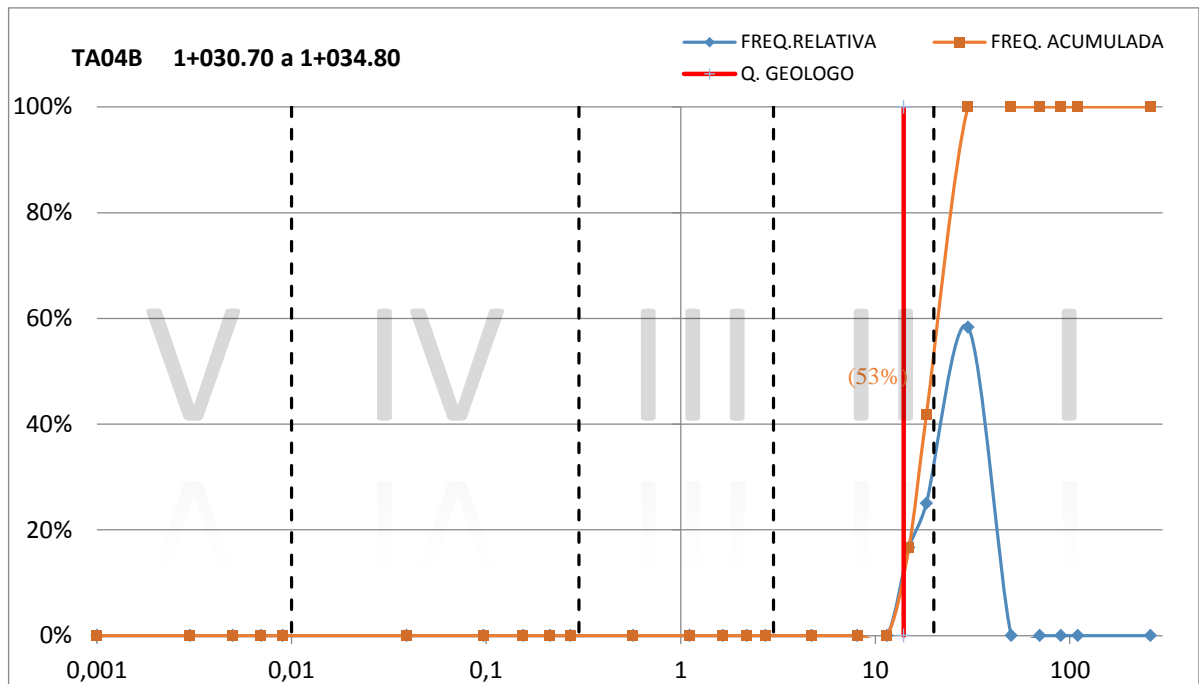


Fig. 5.22 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+030.70 a 1+034.80 pertencente ao túnel de adução 4 frente B

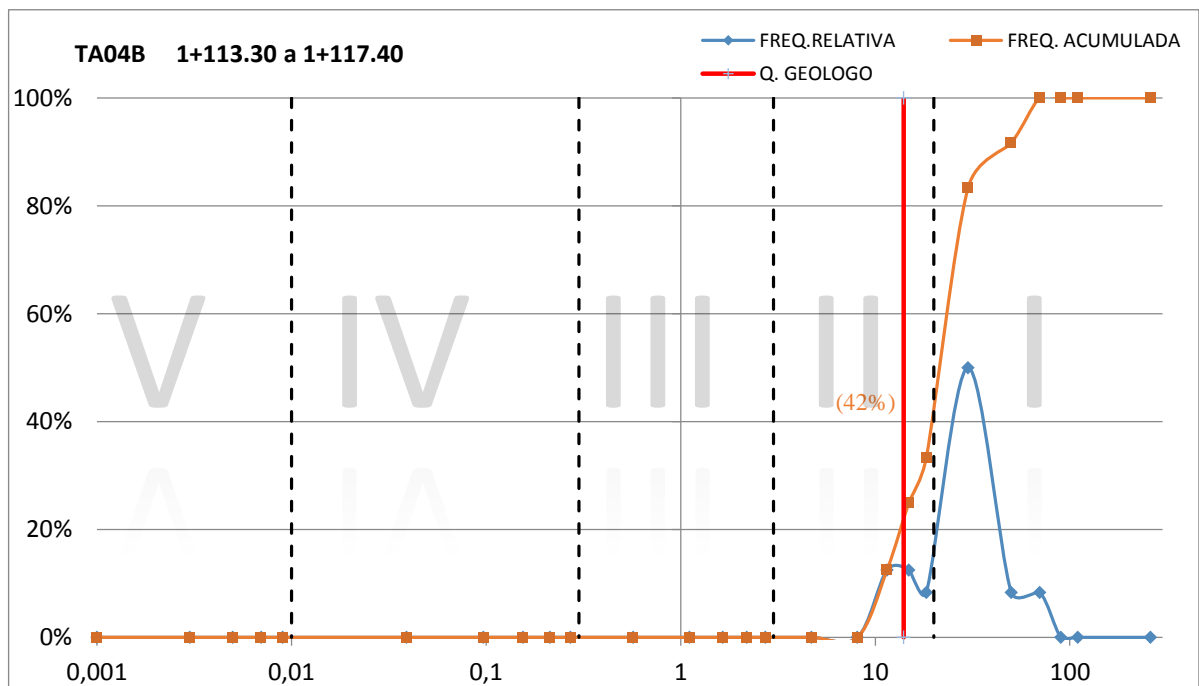


Fig. 5.23 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+113.30 a 1+117.40 pertencente ao túnel de adução 4 frente B

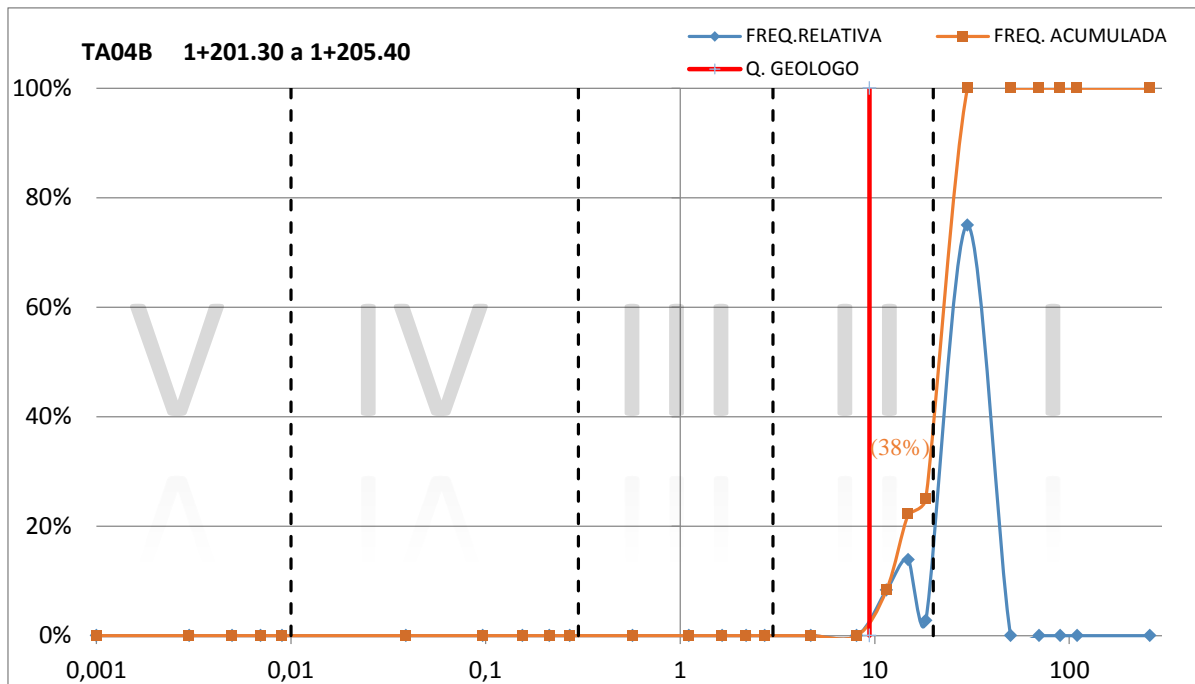


Fig. 5.24 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+201.30 a 1+205.40 pertencente ao túnel de adução 4 frente B

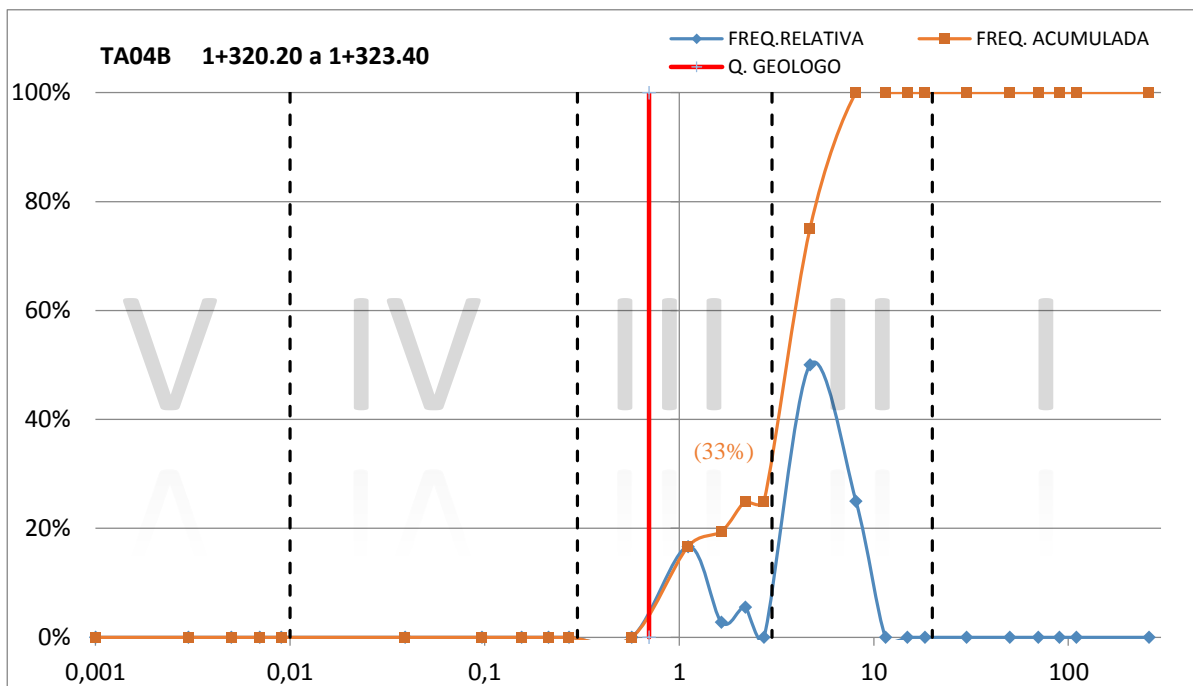


Fig. 5.25 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+320.20 a 1+323.40 pertencente ao túnel de adução 4 frente B

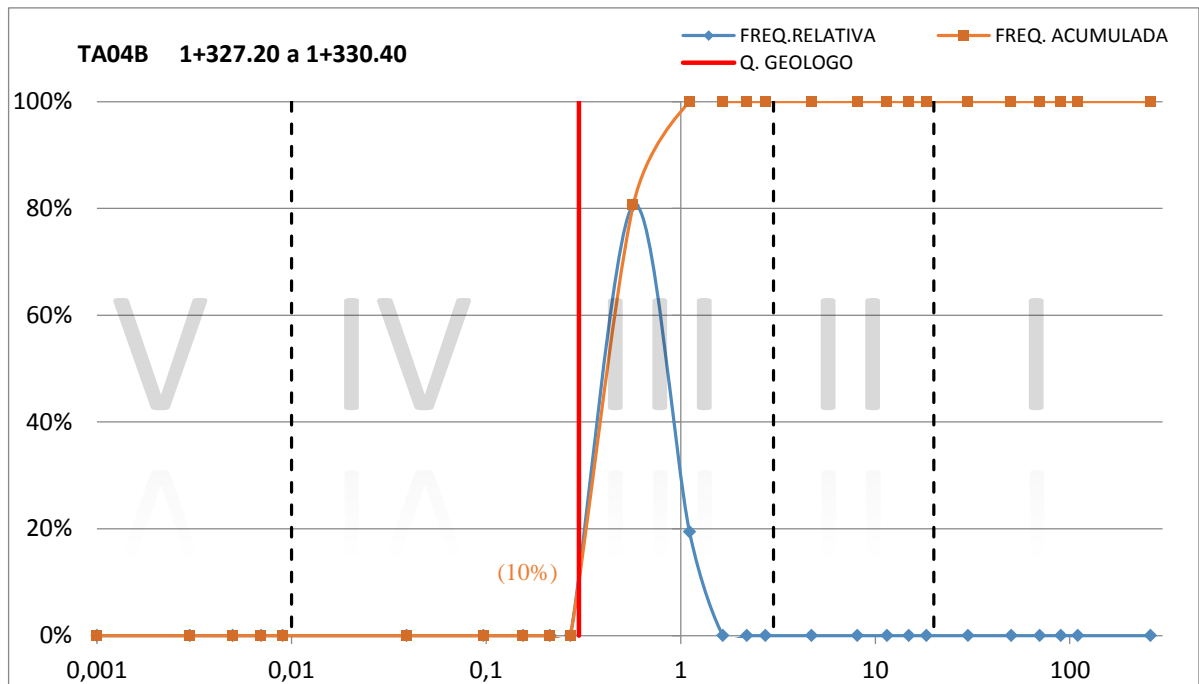


Fig. 5.26 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+327.20 a 1+330.40 pertencente ao túnel de adução 4 frente B

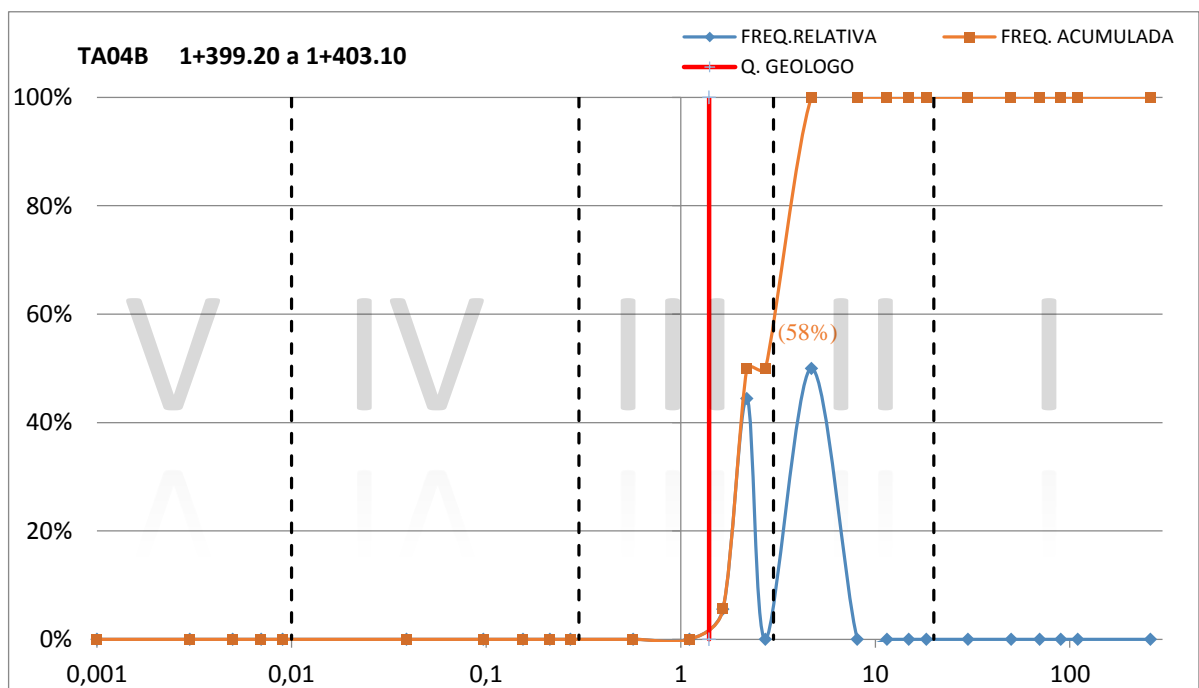


Fig. 5.27 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+399.20 a 1+403.10 pertencente ao túnel de adução 4 frente B

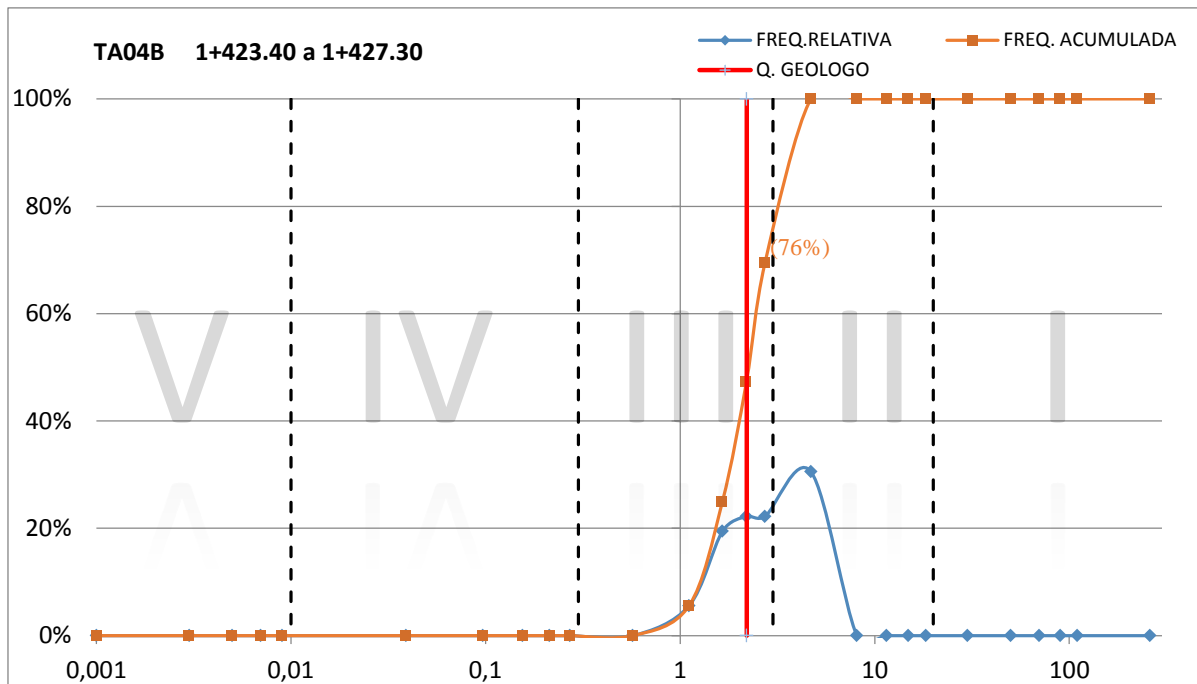


Fig. 5.28 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+423.40 a 1+427.30 pertencente ao túnel de adução 4 frente B

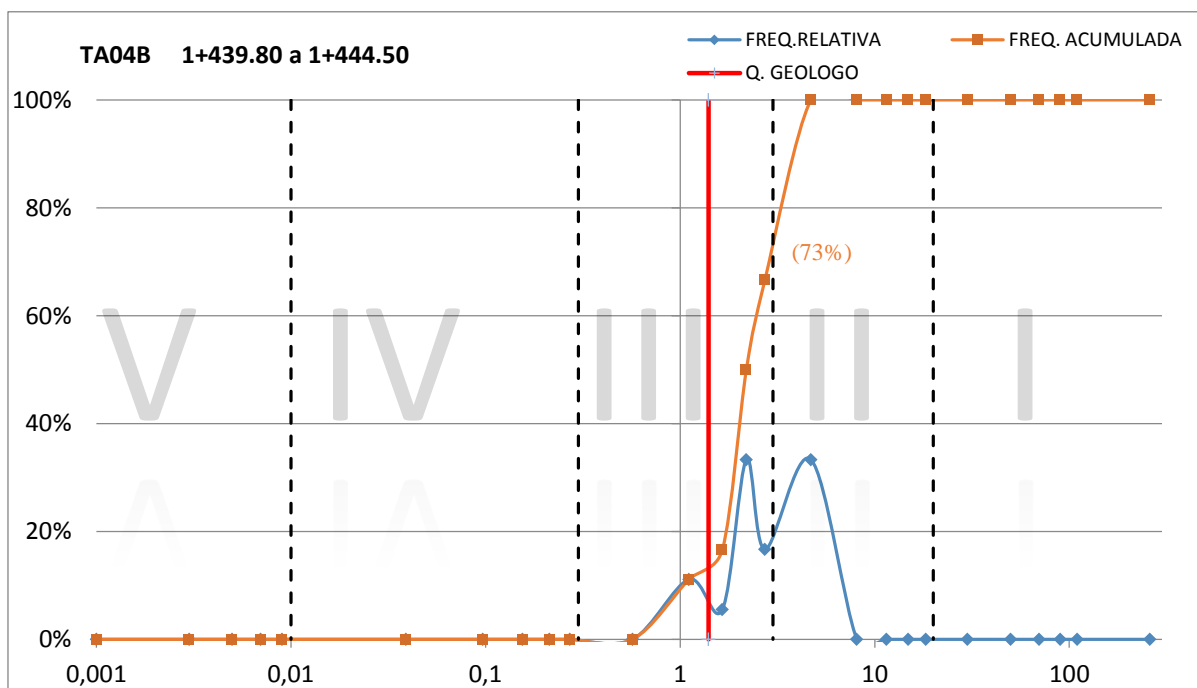


Fig. 5.29 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+439.80 a 1+444.50 pertencente ao túnel de adução 4 frente B

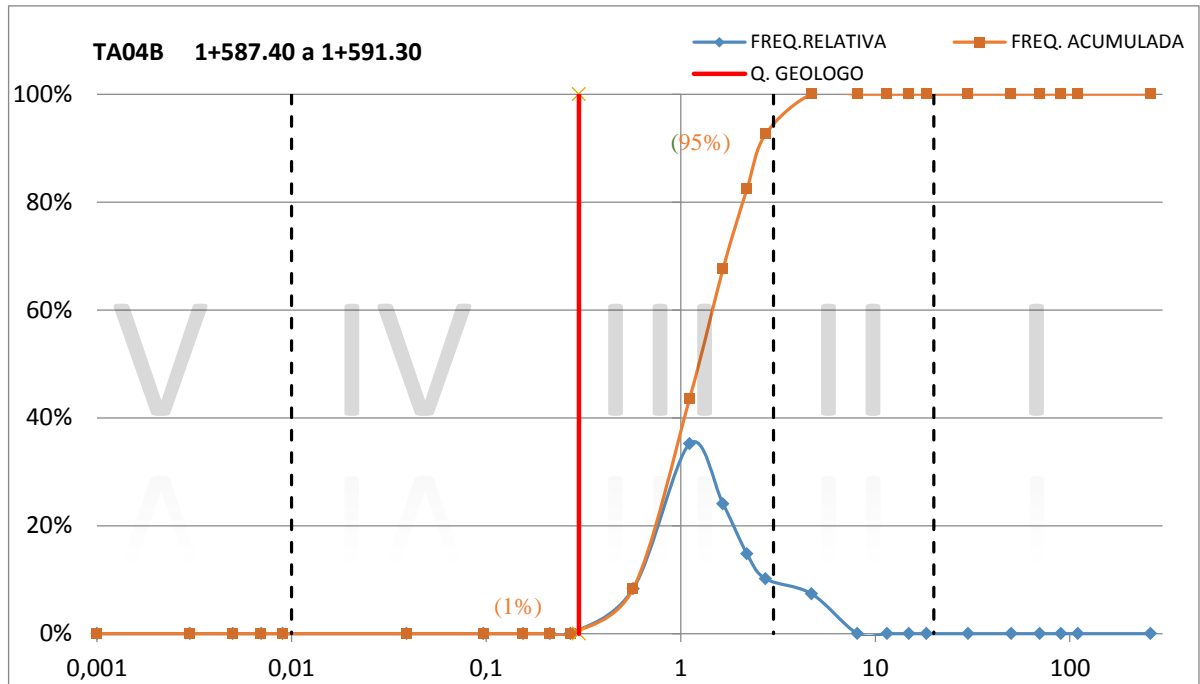


Fig. 5.30 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+587.40 a 1+591.30 pertencente ao túnel de adução 4 frente B

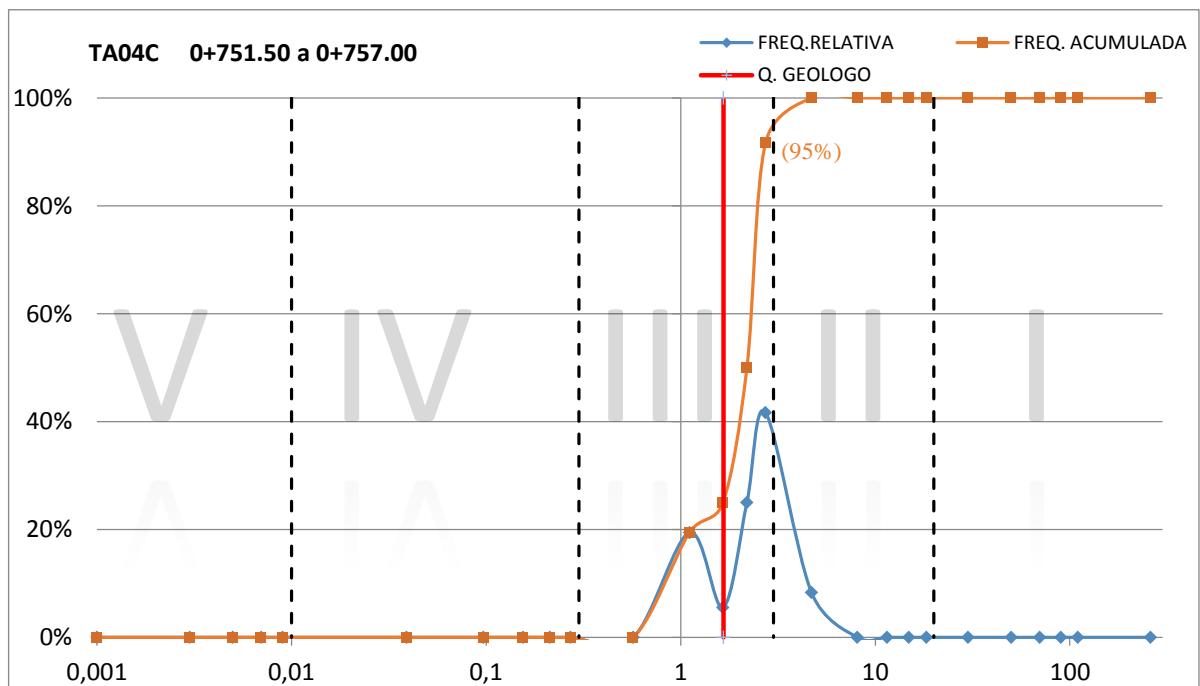


Fig. 5.31 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+751.50 a 0+757.00 pertencente ao túnel de adução 4 frente C

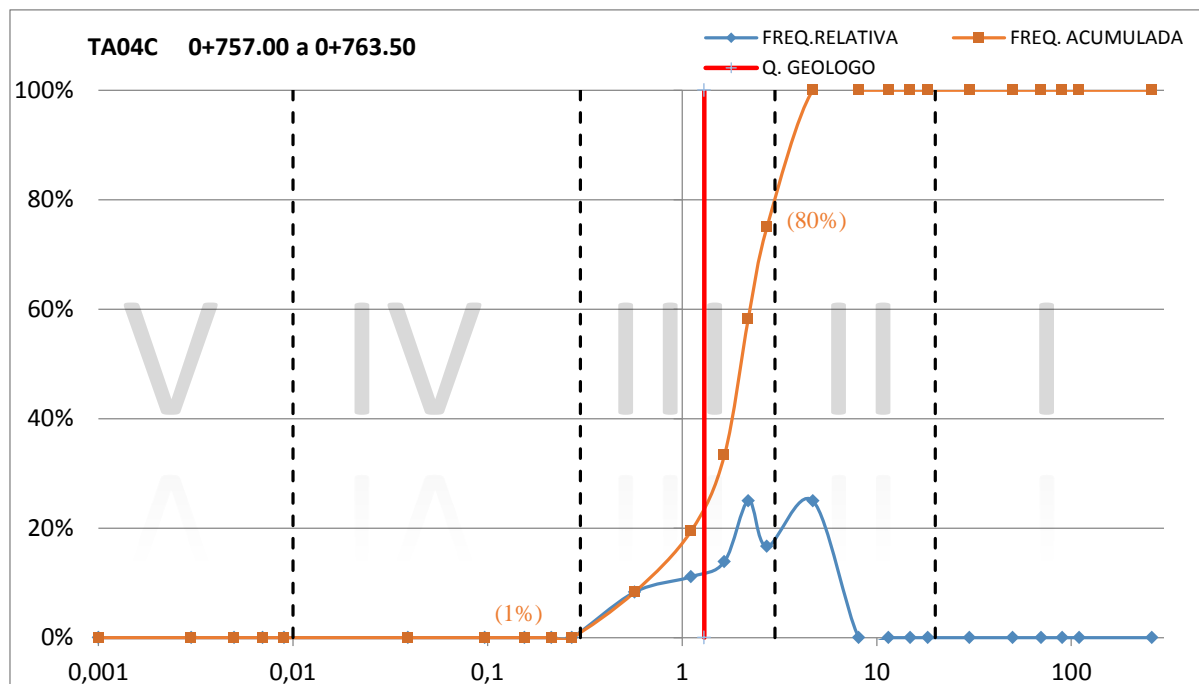


Fig. 5.32 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+757.00 a 0+763.50 pertencente ao túnel de adução 4 frente C

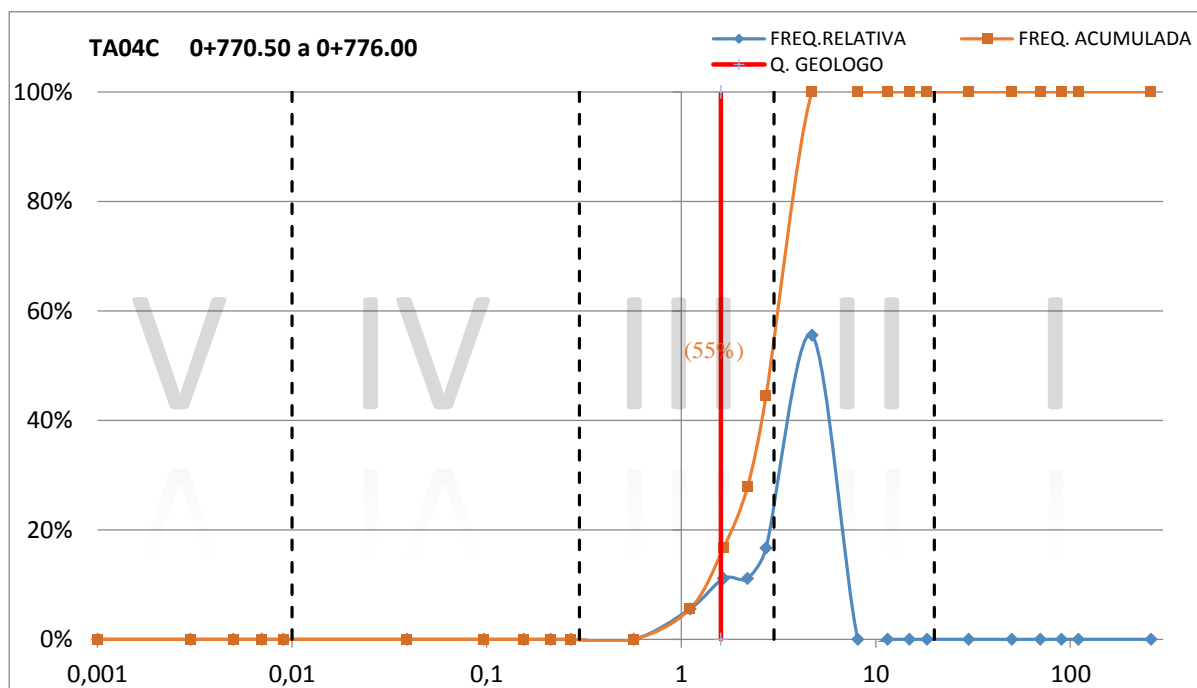


Fig. 5.33 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+770.50 a 0+776.00 pertencente ao túnel de adução 4 frente C

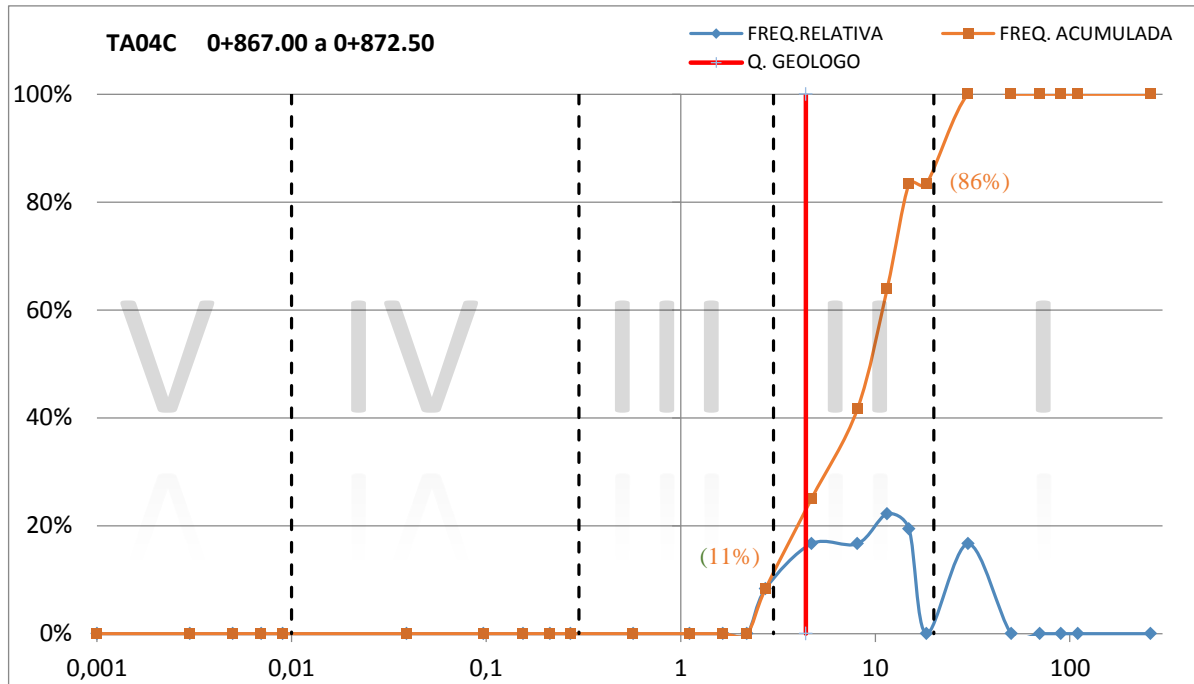


Fig. 5.34 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de 0+867.00 a 0+872.50 pertencente ao túnel de adução 4 frente C

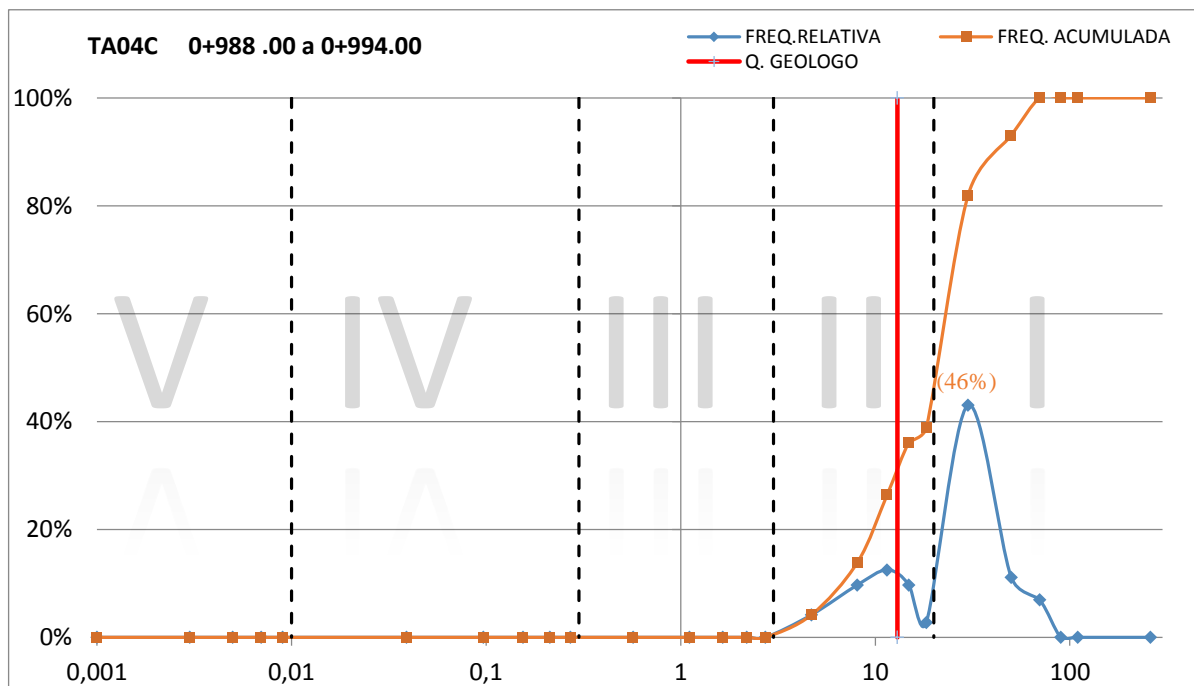


Fig. 5.35 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+988.00 a 0+994.00 pertencente ao túnel de adução 4 frente C

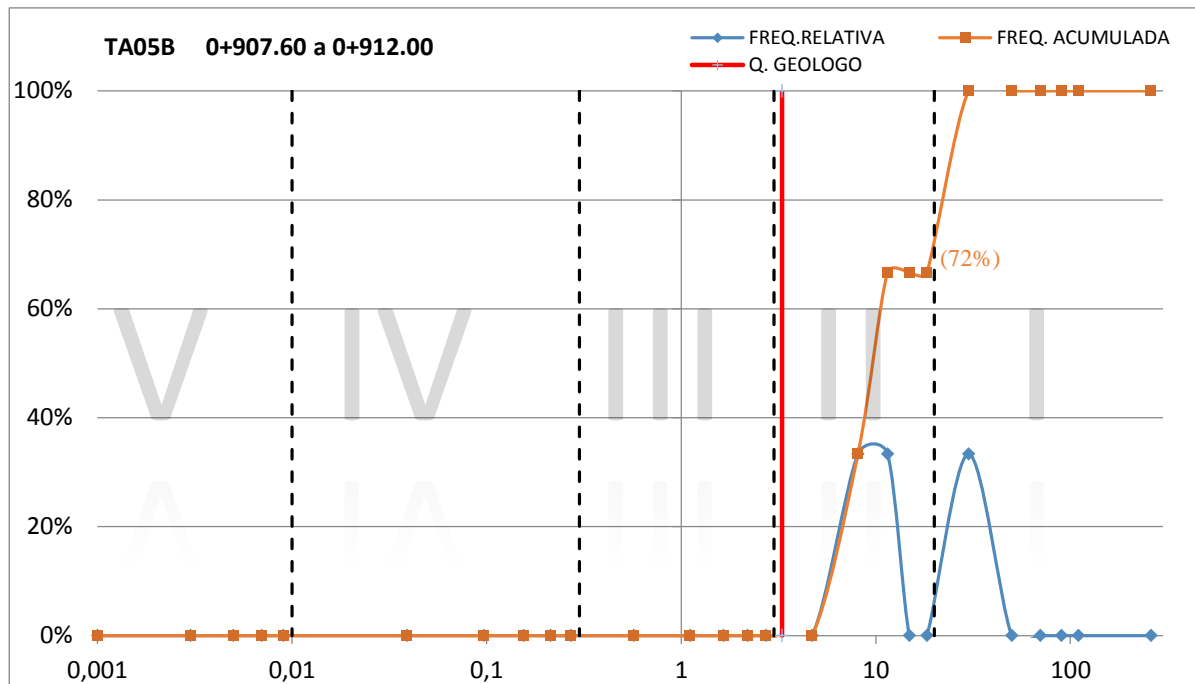


Fig. 5.36 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+907.60 a 0+912.00 pertencente ao túnel de adução 5 frente B

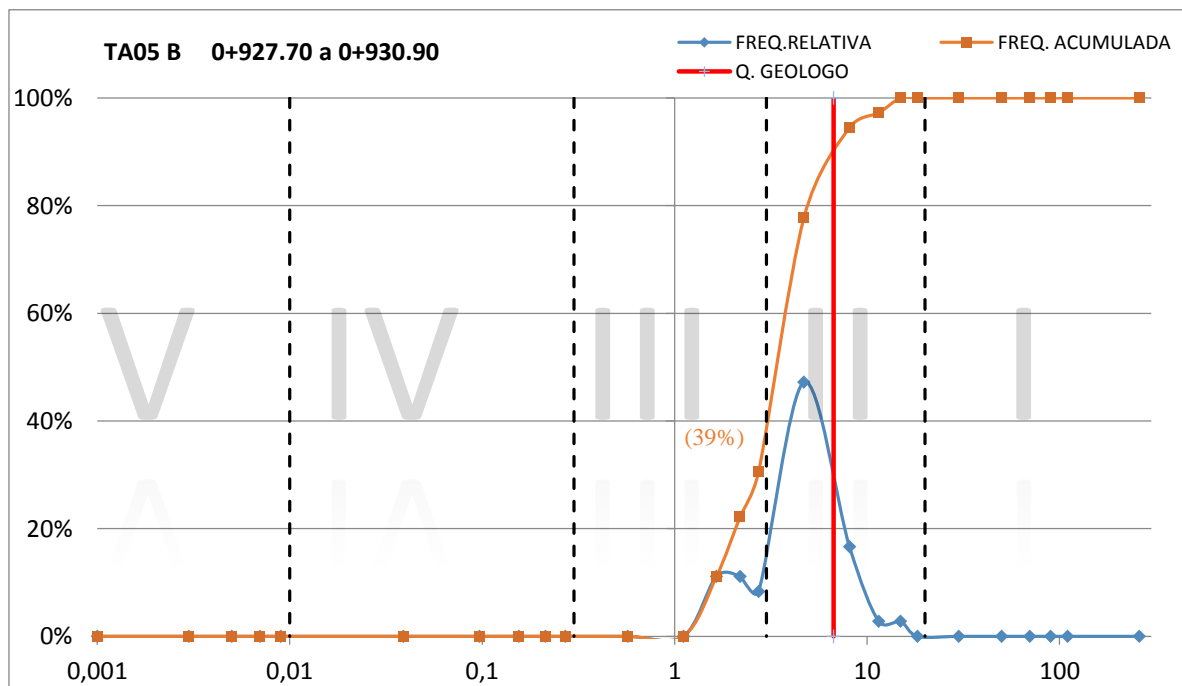


Fig. 5.37 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+927.70 a 0+930.90 pertencente ao túnel de adução 5 frente B

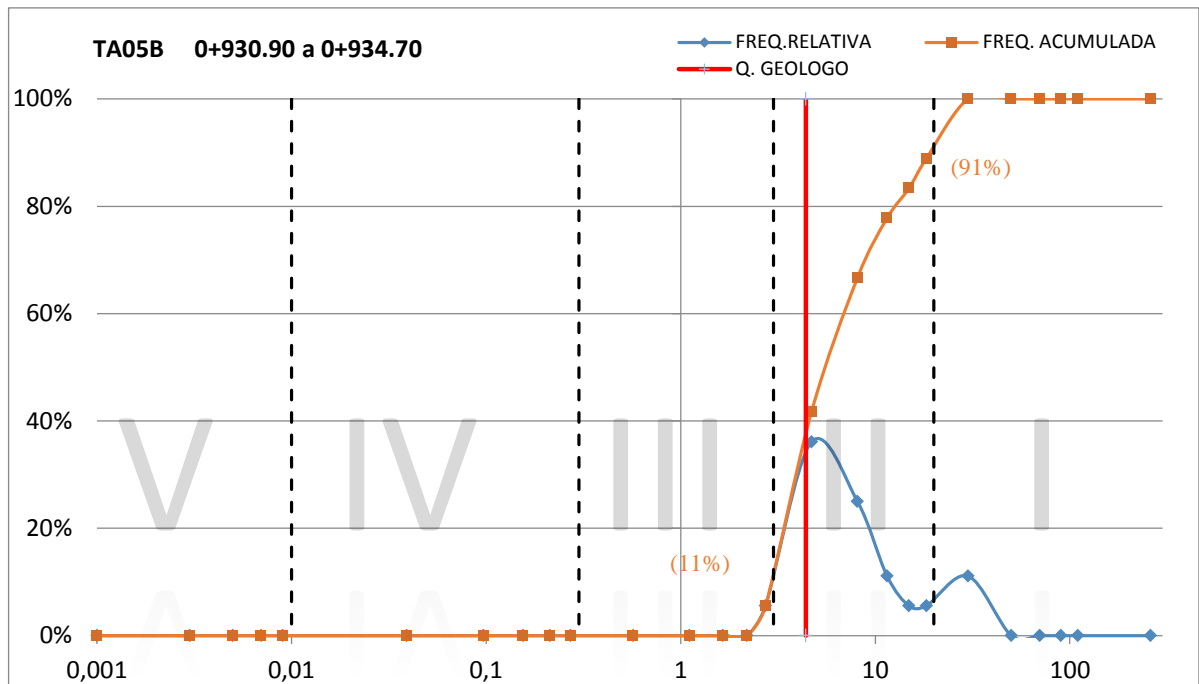


Fig. 5.38 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+930.90 a 0+934.70 pertencente ao túnel de adução 5 frente B

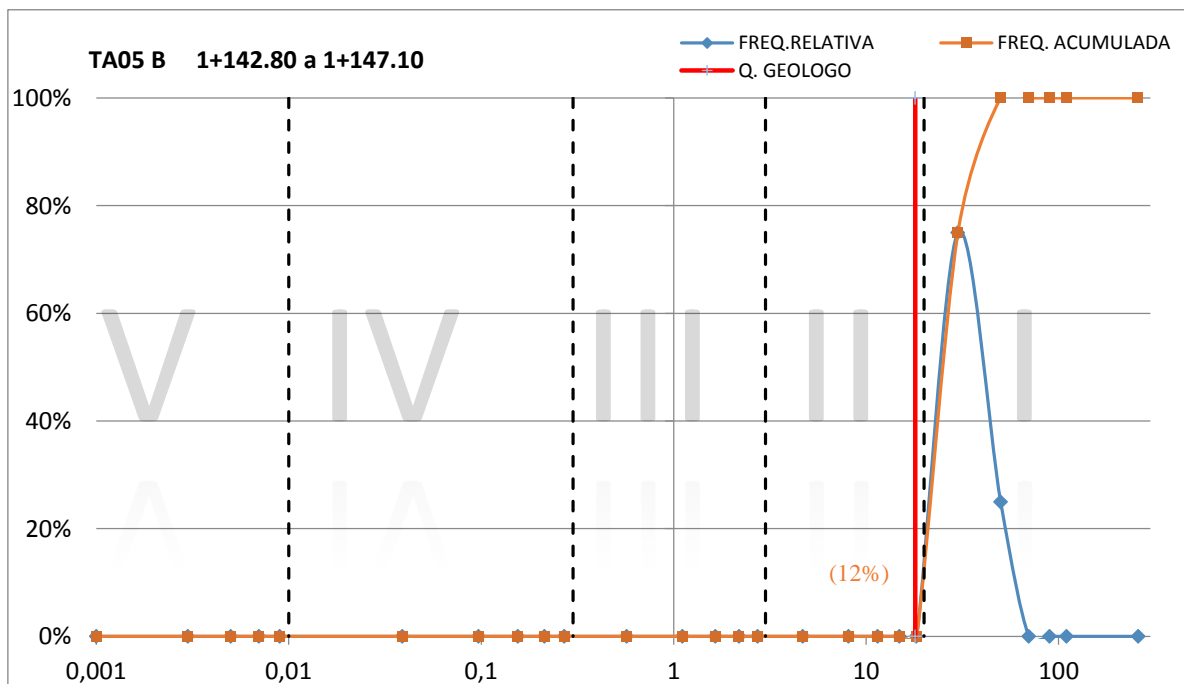


Fig. 5.39 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+142.80 a 1+147.10 pertencente ao túnel de adução 5 frente B

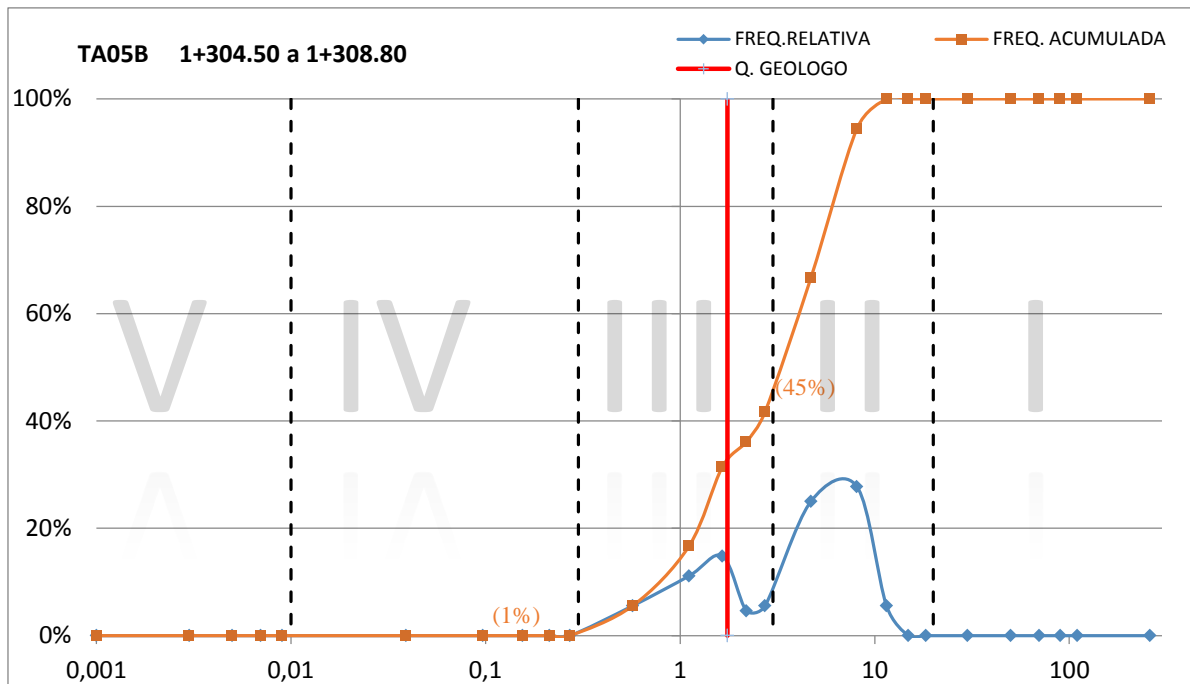


Fig. 5.40 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+304.50 a 1+308.80 pertencente ao túnel de adução 5 frente B

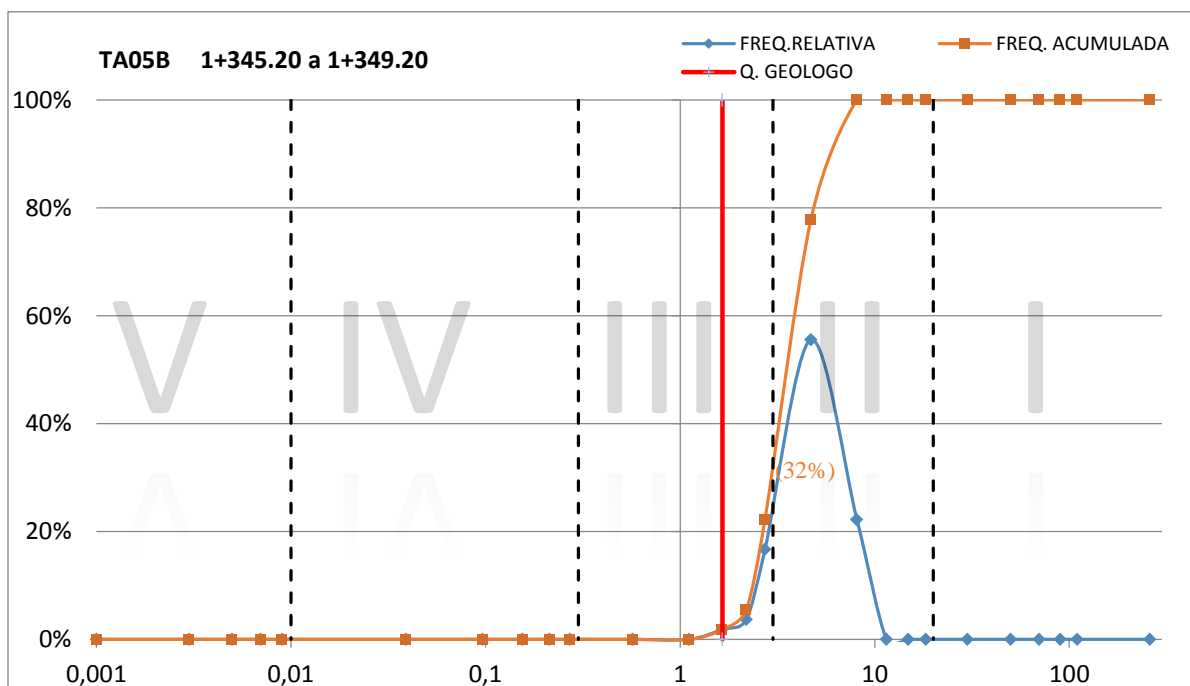


Fig. 5.41 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+345.20 a 1+349.20 pertencente ao túnel de adução 5 frente B

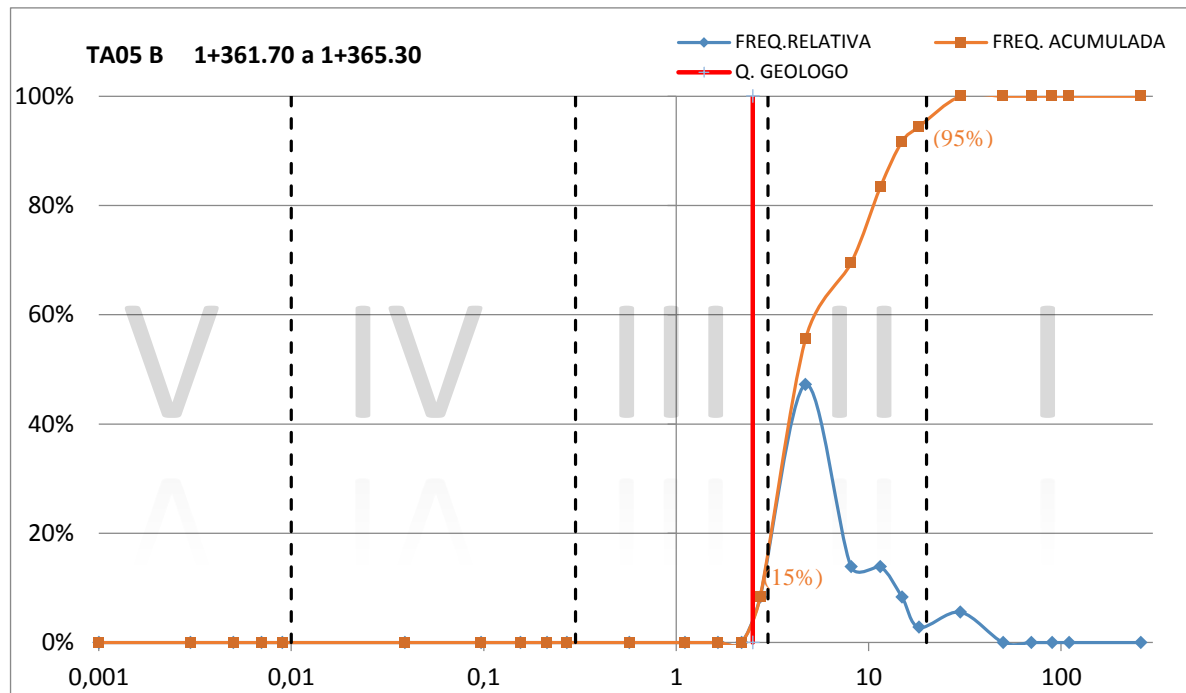


Fig. 5.42 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+361.70 a 1+365.30 pertencente ao túnel de adução 5 frente B

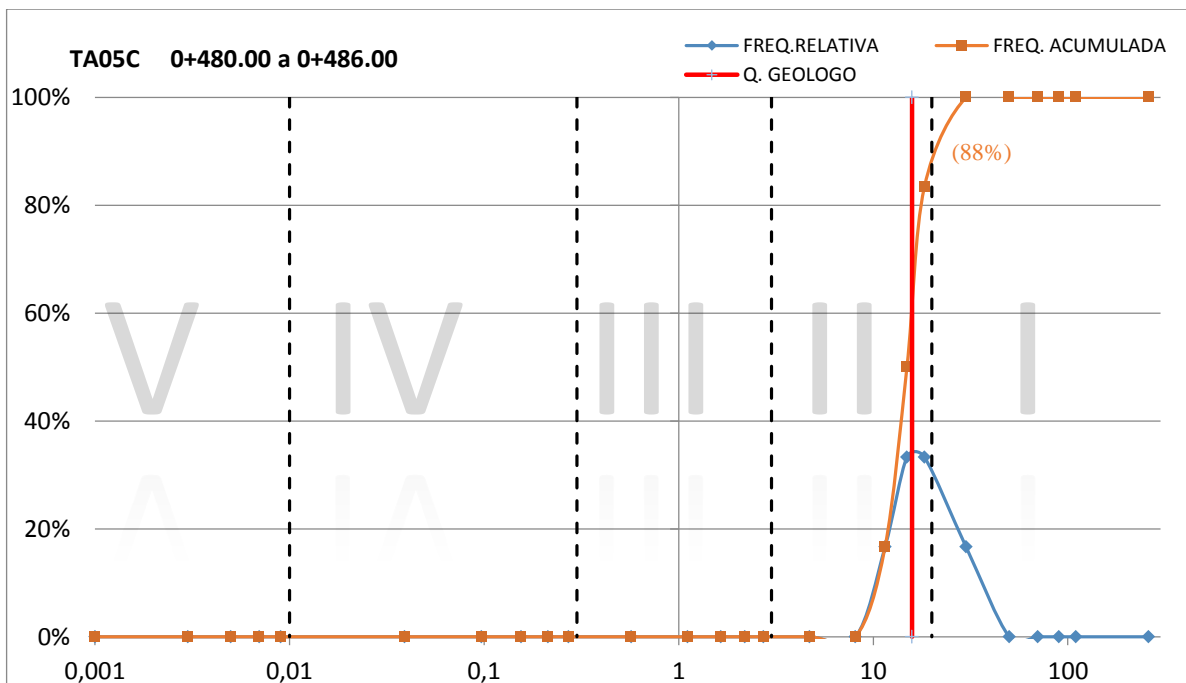


Fig. 5.43 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+480.00 a 0+486.00 pertencente ao túnel de adução 5 frente C

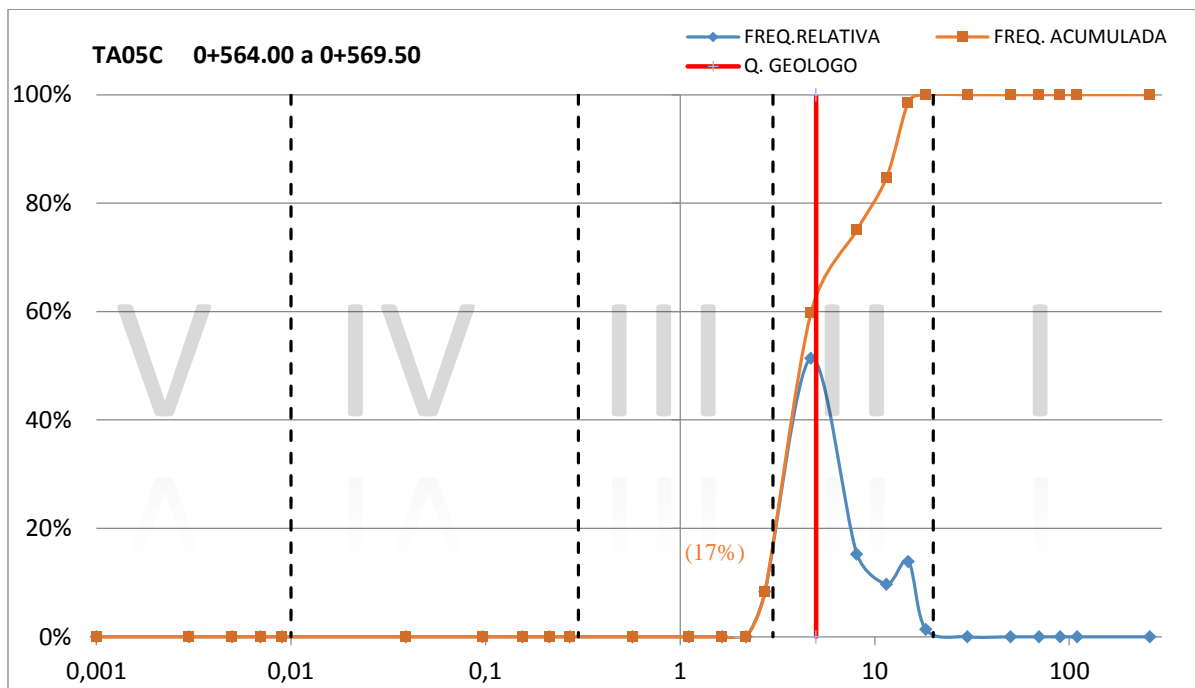


Fig. 5.44 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+564.00 a 0+569.50 pertencente ao túnel de adução 5 frente C

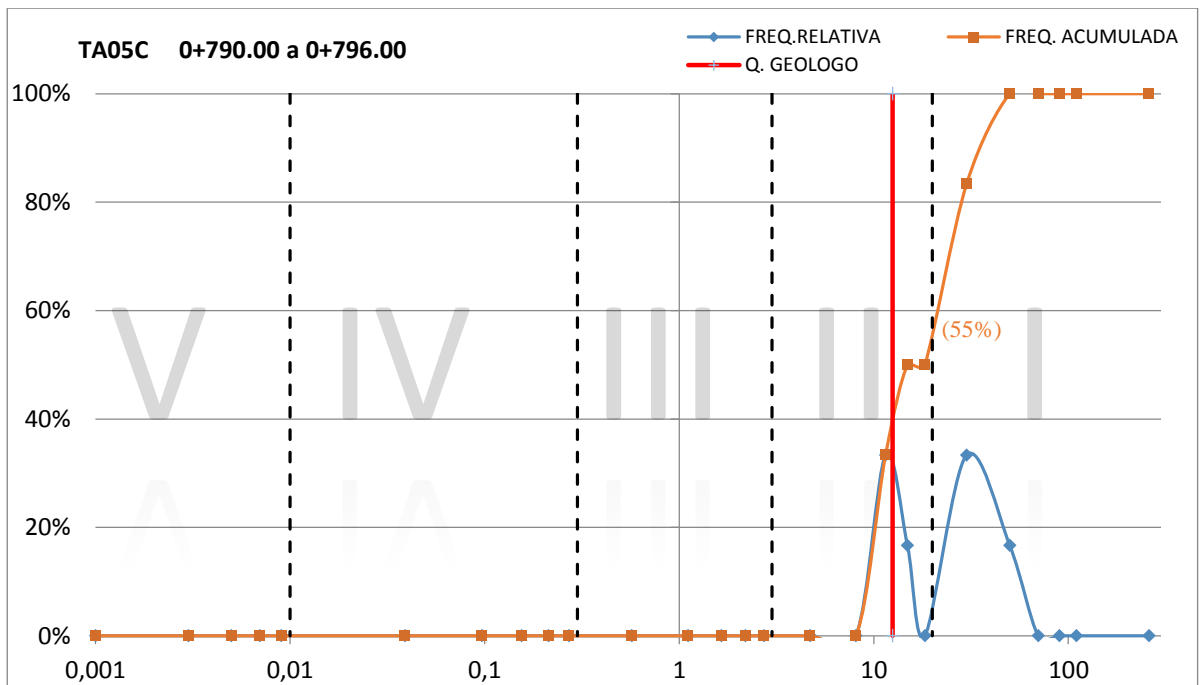


Fig. 5.45 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+790.00 a 0+796.00 pertencente ao túnel de adução 5 frente C

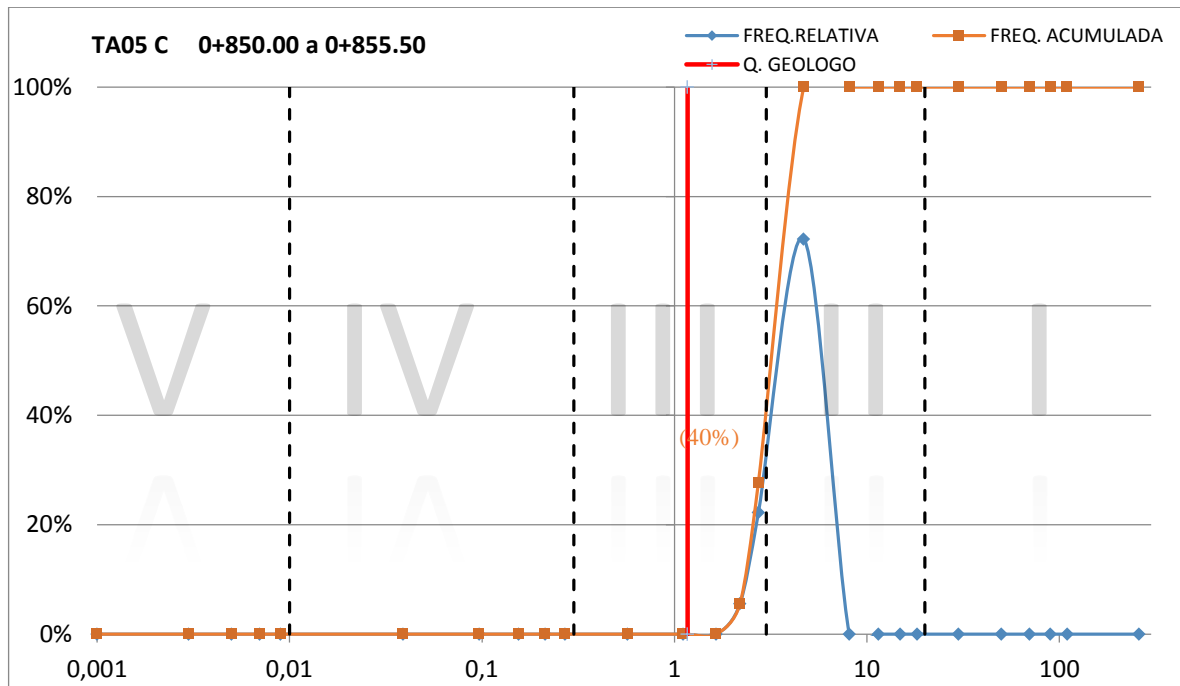


Fig. 5.46 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+850.00 a 0+855.50 pertencente ao túnel de adução 5 frente C

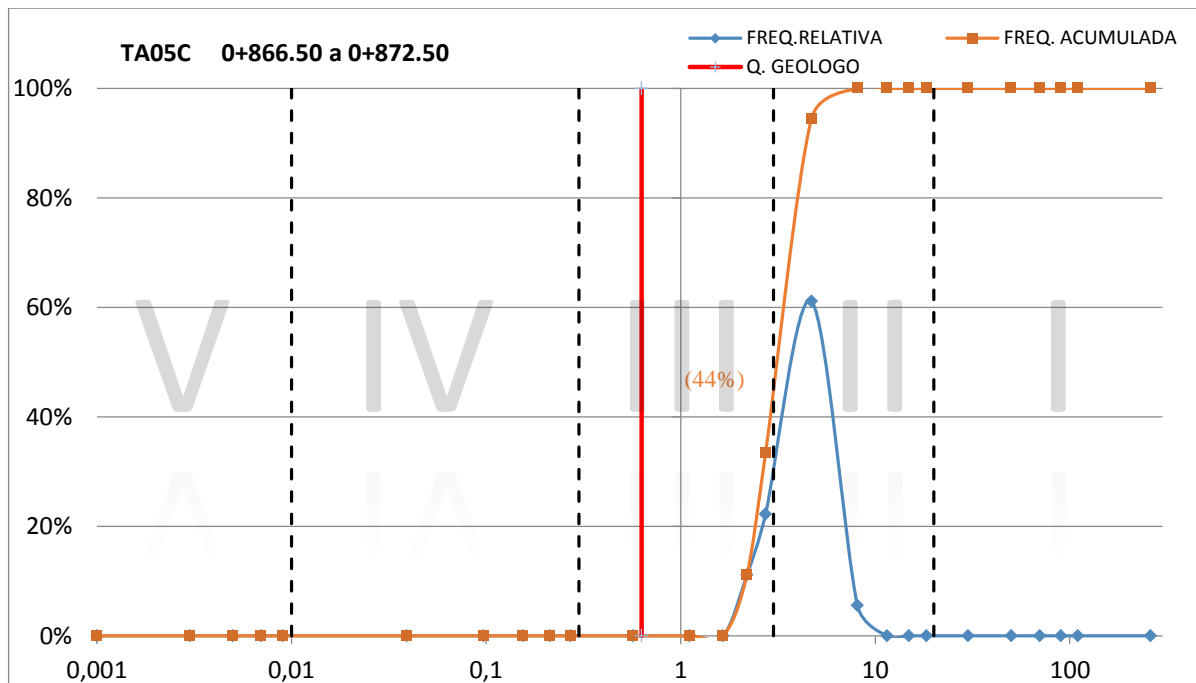


Fig. 5.47 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+866.50 a 0+872.50 pertencente ao túnel de adução 5 frente C

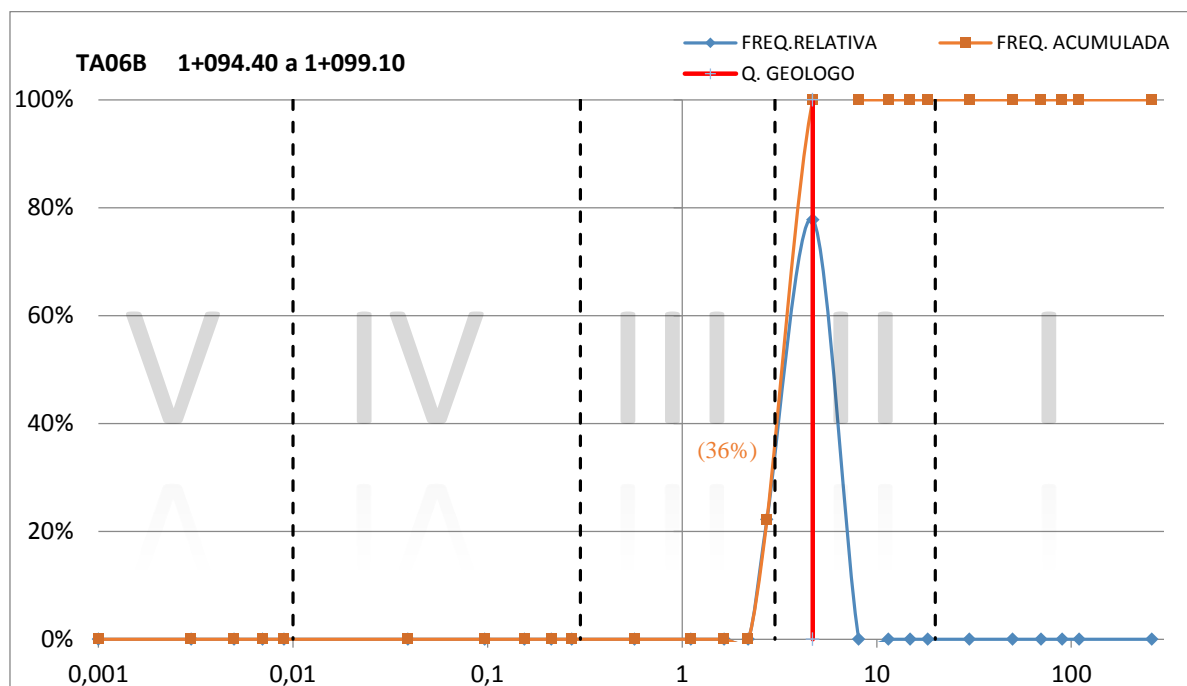


Fig. 5.48 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 1+094.49 a 1+099.10 pertencente ao túnel de adução 6 frente B

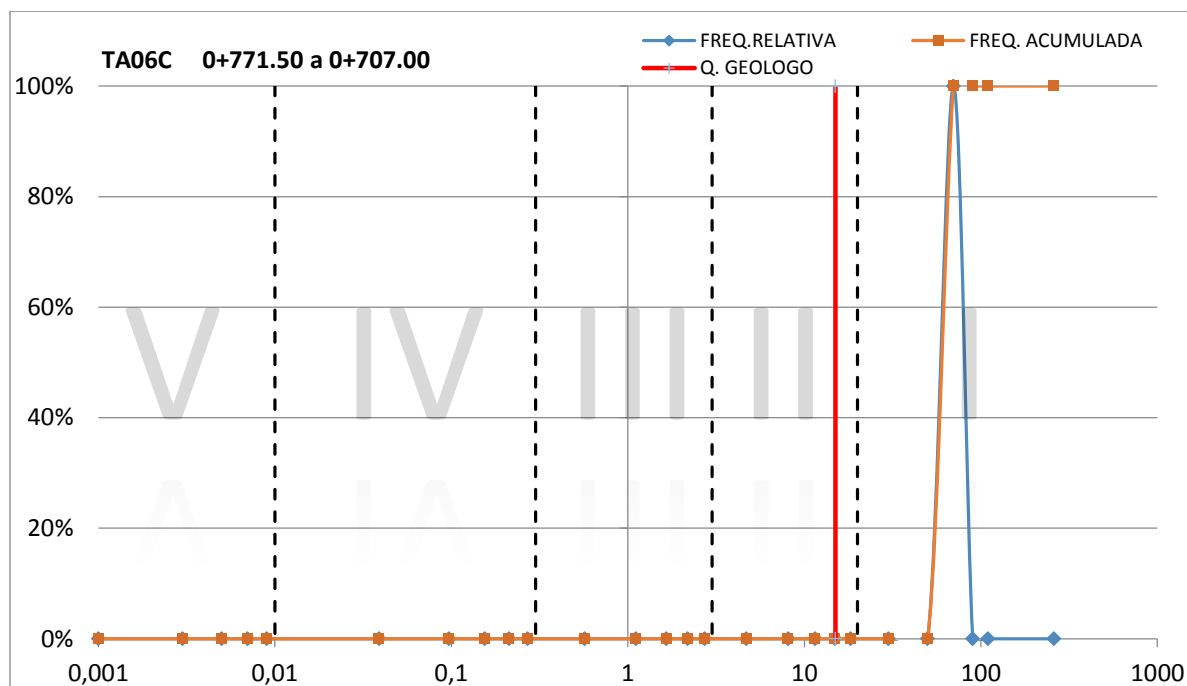


Fig. 5.49 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+771.50 a 0+707.00 pertencente ao túnel de adução 6 frente C

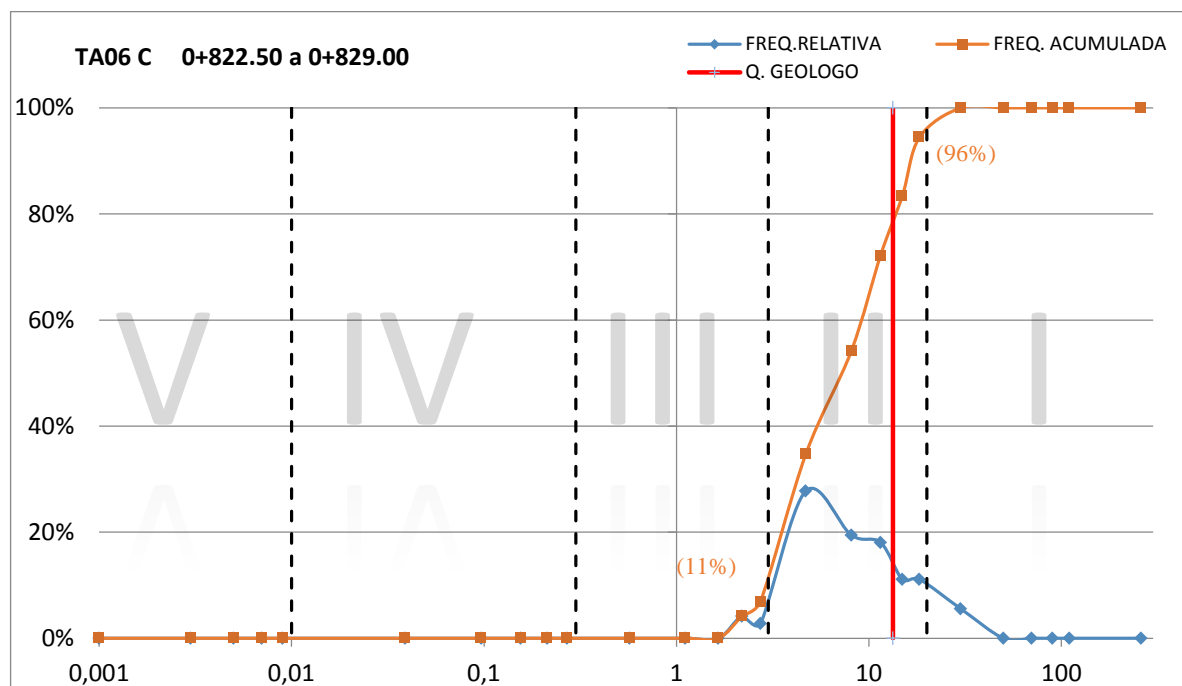


Fig. 5.50 - Gráfico de frequências dos valores de Q - Barton obtidos pela combinação dos diferentes parâmetros para a secção de avanço 0+822.50 a 0+829.00 pertencente ao túnel de adução 6 frente C

Os gráficos acima representados foram construídos a partir da frequência relativa de todos os valores de Q - Barton obtidos para cada secção. A classificação do maciço foi calculada como probabilidade de ocorrência através da intersecção da frequência relativa acumulada com os valores de Q - Barton limite de cada classe (linhas a tracejado).

Na Tabela 5.1 apresenta-se, de forma resumida, a probabilidade percentual de cada classe obtida através da gama de valores de Q - Barton calculados para cada secção, assim como o seu valor médio. De forma a facilitar a comparação de valores apresenta-se também o índice Q - Barton estimado e adotado em obra e a respetiva classificação do maciço de cada avanço estudado.

Tabela 5.1 - Análise estatística dos casos de estudo

Frente	Progressiva	Q adoptado em obra	Classe (obra)	Análise estatística dos valores Q - Barton calculados					
				Q médio calculado	Classe (%)				
					I	II	III	IV	V
TA 1B	0+871.70 a 0+875.60	10,0	II	43,7	87	13			
TA 1B	0+961.90 a 0+966.10	2,9	III	18,0	26	74			
TA 1B	1+285.50 a 1+288.30	18,9	II	25,4	52	48			
TA 1B	1+370.70 a 1+373.80	17,8	II	21,8	25	75			
TA 1B	1+384.80 a 1+388.50	18,9	II	44,6	90	10			
TA 1C	0+825.00 a 0+831.00	15,0	II	27,8	85	15			
TA 2B	1+006.80 a 1+010.90	2,9	III	4,1		39	61		
TA 2B	1+329.40 a 1+331.50	18,9	II	13,4	13	87			
TA 2B	1+412.70 a 1+416.60	14,2	II	8,5	4	89	7		
TA 2C	0+342.00 a 0+348.00 (A)	15,0	II	64,5	100				
TA 2C	0+342.00 a 0+348.00 (B)	15,0	II	44,8	93	6			
TA 2C	0+501.50 a 0+506.00	13,3	II	26,5	67	33			
TA 2C	0+881.50 a 0+885.50	14,2	II	10,1		95	5		
TA 3B	1+361.70 a 1+365.90	17,8	II	37,3	87	13			
TA 3B	1+406.10 a 1+410.50	14,2	II	20,1	25	75			
TA 3B	1+117.80 a 1+121.10	4,7	II	25,2	48	52			
TA 3C	0+692.00 a 0+698.00 (A)	6,7	II	31,5	83	17			
TA 3C	0+692.00 a 0+698.00 (B)	6,7	II	38,6	92	8			
TA 3C	0+804.00 a 0+810.00	15,0	II	15,1	25	70	5		
TA 3C	0+904.50 a 0+910.50	4,7	II	15,0	13	85	2		
TA 4B	1+005.60 a 1+008.90	13,3	II	22,2	50	50			
TA 4B	1+030.70 a 1+034.80	14,2	II	24,5	47	53			
TA 4B	1+113.30 a 1+117.40	14,2	II	29,3	58	42			
TA 4B	1+201.30 a 1+205.40	9,4	II	25,2	62	38			
TA 4B	1+320.20 a 1+323.40	0,7	III	4,9		67	33		
TA 4B	1+327.20 a 1+330.40	0,3	IV	0,7		10	90		
TA 4B	1+399.20 a 1+403.10	1,4	III	3,4		42	58		
TA 4B	1+423.40 a 1+427.30	2,2	III	2,7		24	76		
TA 4B	1+439.80 a 1+444.50	1,4	III	2,9		27	73		
TA 4B	1+587.40 a 1+591.30	0,3	III	1,7		5	94	1	
TA 4C	0+751.50 a 0+757.00	1,7	III	2,2		5	95		
TA 4C	0+757.00 a 0+763.50	1,3	III	2,2		20	79	1	
TA 4C	0+770.50 a 0+776.00	1,6	III	3,5		45	55		
TA 4C	0+867.00 a 0+872.50	4,4	II	11,9	14	75	11		
TA 4C	0+988.00 a 0+994.00	13,3	II	26,3	54	46			
TA 5B	0+907.60 a 0+912.00	3,3	II	16,5	28	72			
TA 5B	0+927.70 a 0+930.90	6,7	II	4,8		61	39		
TA 5B	0+930.90 a 0+934.70	4,4	II	9,6	9	80	11		
TA 5B	1+142.80 a 1+147.10	17,8	II	35,4	88	12			
TA 5B	1+304.50 a 1+308.80	1,8	III	4,3		55	44	1	
TA 5B	1+345.20 a 1+349.20	1,7	III	4,7		68	32		
TA 5B	1+361.70 a 1+365.30	2,5	III	7,8	5	80	15		
TA 5C	0+480.00 a 0+486.00	15,8	II	16,8	12	88			
TA 5C	0+564.00 a 0+569.50	5,0	II	6,9		83	17		
TA 5C	0+790.00 a 0+796.00	12,5	II	24,6	45	55			
TA 5C	0+850.00 a 0+855.50	1,2	III	3,3		60	40		
TA 5C	0+866.50 a 0+872.50	0,6	III	4,1		56	44		
TA 6B	1+094.40 a 1+099.10	4,7	II	4,1		64	36		
TA 6C	0+701.50 a 0+707.00	15,0	II	64,5	100				
TA 6C	0+822.50 a 0+829.00	13,3	II	10,0	4	85	11		

Analisando a Tabela 5.1 repara-se que, de forma geral, os valores de Q - Barton médios calculados através da combinação de parâmetros são superiores aos valores estimados. Esta constatação sugere, só por si, que, de facto, na grande maioria das secções a parametrização em obra foi efetuada de forma conservativa ou, como é bastante frequente, mantendo os parâmetros dos avanços anteriores de forma a uniformizar a classe e tratamento do respetivo túnel, mesmo que estes não correspondam integralmente às características do maciço.

Como se pode verificar na Tabela 5.1, as secções de maciço classe de II são as mais suscetíveis de alteração de classe visto que oito em trinta e duas secções correspondente a 25% da amostragem desta classe apresentam valores de probabilidade superiores a 80 % de serem classificados como classe I. A estes casos referem-se os avanços 0+871.70 a 0+875.60, 1+384.80 a 1+388.50 e 0+825.00 a 0+831.00 pertencentes ao túnel de adução 1, 0+342.00 a 0+348.00 (B) pertencente ao túnel de adução 2, 1+361.70 a 1+365.90, 0+692.00 a 0+698.00 (A) pertencentes ao túnel de adução 3, 1+142.80 a 1+147.10 pertencente ao túnel de adução 5 e ao avanço 0+701.50 a 0+707.00 pertencente ao túnel de adução 6. É de destacar também as secções de avanço 0+501.50 a 0+506.00 e 1+201.30 a 1+205.40 que, com probabilidades de passar a classe inferior de 67% e 62% e valores de índice Q - Barton médio de 26,5 e 25,2 respetivamente, poderiam com um menor grau de certeza ser também classificadas como classe I

É de relembrar que para as secções de avanço 0+342.00 a 0+348.00 e 0+692.00 a 0+698.00, ambas avaliadas segundo duas zonas cartografadas diferentes (5m), são utilizadas para o estudo estatístico as secções mais penalizantes 0+342.00 a 0+348.00 (B) e 0+692.00 a 0+698.00 (A).

Para as 15 secções avaliadas como classe III, evidencia-se a secção de progressiva 0+961.90 a 0+966.10 e 1+320.20 a 1+323.40 pertencentes aos túneis de adução 1 e 4 respetivamente, e as secções de avanço 1+345.20 a 1+349.20 e 1+361.70 a 1+365.30 pertencentes ao túnel de adução 5. Estas secções, com uma probabilidade considerável entre 67% e 80% de serem classificadas quanto à qualidade do maciço rochoso como classe II, correspondem a 26,7% da amostragem de classe III.

Na análise estatística da única secção com classificação do maciço rochoso pertencente a classe IV de progressiva 1+327.20 a 1+330.40, obteve-se probabilidade nula referente a esta classe, 90% referente à classe III e ainda 10 % referente à probabilidade do maciço rochoso ser classificado como classe II. Estes valores probabilísticos sugerem que nesta secção em particular o valor de Q - Barton adotado na classificação do maciço foi bastante conservativo para o maciço em questão. Analisando particularmente os parâmetros calculados relativamente a este caso, depara-se com valores de J_r superiores na ordem dos 50% e valores de J_a inferiores na ordem dos 13,5%.

Sendo este um estudo estatístico ao qual estão associadas aproximações, não se consideram relevantes valores de probabilidade de mudança de classe inferiores a 65%. De um modo geral, concluiu-se que 29 % da amostragem estudada foi classificada, quanto à qualidade do maciço rochoso, com uma classe superior àquela que o maciço realmente apresentava.

5.3. ANÁLISE GLOBAL DOS VALORES DE Q - BARTON

De forma a quantificar o impacto que os erros cometidos associados à parametrização do sistema do Q - Barton, teriam no prazo de execução e no custo dos tratamentos geotécnicos associados a uma obra cujas estatísticas globais fossem estatisticamente representadas pela amostragem estudada, procedeu-se à análise estatística de forma global dos quarenta e oito valores de Q - Barton estimados na obra, comparativamente com os 3252 obtidos a partir da combinação de parâmetros no Capítulo 4. Estes dados foram estudados estatisticamente de forma idêntica à análise individual efetuada no subcapítulo

anterior, organizou-se os valores de Q - Barton por intervalos de mesma amplitude estruturados por classe de maciço e recorreu-se a gráficos de frequências no tratamento destes valores.

Nas Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam-se, para os valores de Q - Barton estimados em obra e para os valores calculados por combinação de parâmetros, respetivamente, as frequências absoluta, relativa e relativa acumulada inerente aos intervalos em que se inserem estes valores. Demonstra-se ainda na Figura 5.51 e 5.52 os gráficos de frequências relativas e relativas acumuladas associadas aos pontos médios de cada intervalo para os dois conjuntos de valores de Q - Barton.

Tabela 5.2 – Tabela de frequências obtida através dos 48 valores de Q - Barton estimados em obra

Q - Barton estimado (obra)					
Classe	Intervalo	Ponto médio	Freq. absoluta	Freq. relativa	Freq. relativa acumulada
Classe 5	]0,000 - 0,002]	0,001	0	0,000	0,000
	]0,002 - 0,004]	0,003	0	0,000	0,000
	]0,004 - 0,006]	0,005	0	0,000	0,000
	]0,006 - 0,008]	0,007	0	0,000	0,000
	]0,008 - 0,01]	0,009	0	0,000	0,000
Classe 4	]0,01 - 0,068]	0,039	0	0,000	0,000
	]0,068 - 0,126]	0,097	0	0,000	0,000
	]0,126 - 0,184]	0,155	0	0,000	0,000
	]0,184 - 0,242]	0,213	0	0,000	0,000
	]0,242 - 0,3]	0,271	1	0,021	0,021
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	3	0,063	0,083
	]0,84 - 1,38]	1,11	2	0,042	0,125
	]1,38 - 1,92]	1,65	6	0,125	0,250
	]1,92 - 2,46]	2,19	1	0,021	0,271
	]2,46 - 3]	2,73	3	0,063	0,333
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	7	0,146	0,479
	]6,4-9,8]	8,1	3	0,063	0,542
	]9,8 - 13,2]	11,5	2	0,042	0,583
	]13,2 - 16,6]	14,9	14	0,292	0,875
	]16,6 - 20]	18,3	6	0,125	1,000
Classe 1	]20 - 40]	30	0	0,000	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf]	260	0	0,000	1,000

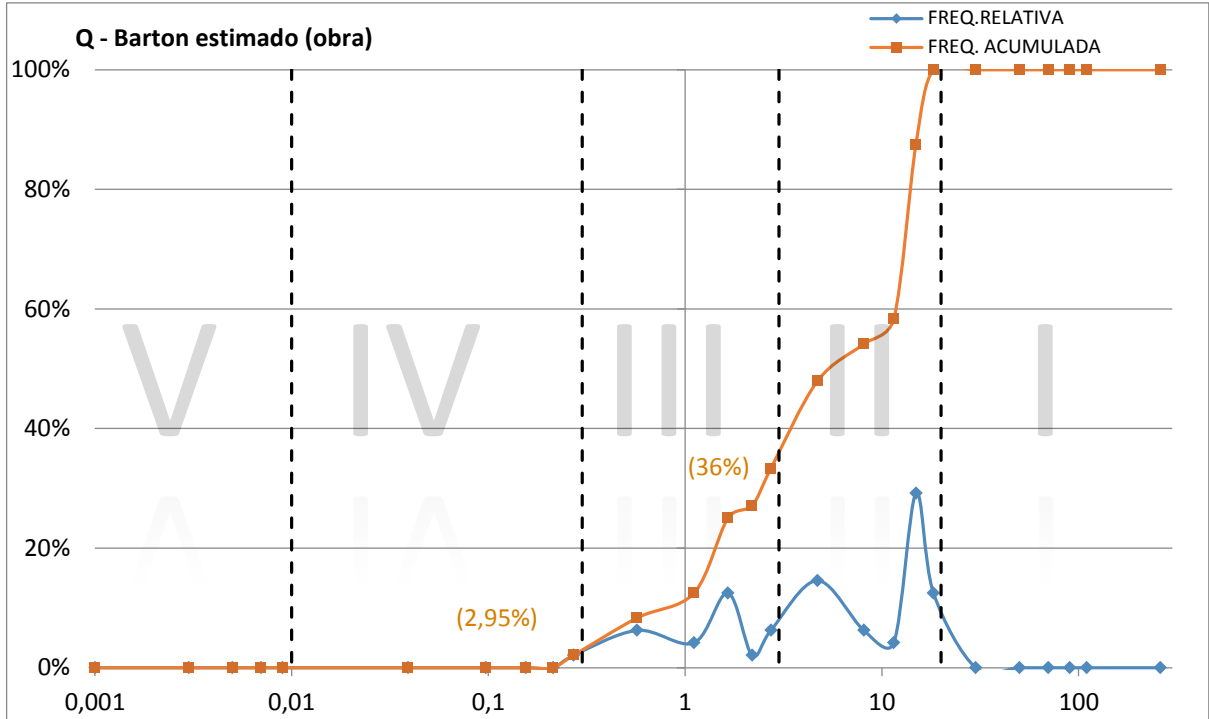


Fig. 5.51 - Gráfico de frequências obtido a partir dos 48 valores de Q - Barton estimados em Obra

Tabela 5.3 - Tabela de frequências obtida através dos 3252 valores de Q - Barton calculado pela combinação de parâmetros

Q - Barton calculado (combinações)					
Classe	Intervalo	Ponto médio	Freq. absoluta	Freq. relativa	Freq. relativa acumulada
Classe 5	[0,000 - 0,002]	0,001	0	0,000	0,000
	]0,002 - 0,004]	0,003	0	0,000	0,000
	]0,004 - 0,006]	0,005	0	0,000	0,000
	]0,006 - 0,008]	0,007	0	0,000	0,000
	]0,008 - 0,01]	0,009	0	0,000	0,000
Classe 4	]0,01 - 0,068]	0,039	0	0,000	0,000
	]0,068 - 0,126]	0,097	0	0,000	0,000
	]0,126 - 0,184]	0,155	0	0,000	0,000
	]0,184 - 0,242]	0,213	0	0,000	0,000
	]0,242 - 0,3]	0,271	0	0,000	0,000
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	76	0,023	0,023
	]0,84 - 1,38]	1,11	117	0,036	0,059
	]1,38 - 1,92]	1,65	101	0,031	0,090
	]1,92 - 2,46]	2,19	185	0,057	0,147
	]2,46 - 3]	2,73	163	0,050	0,197
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	640	0,197	0,394
	]6,4 - 9,8]	8,1	328	0,101	0,495
	]9,8 - 13,2]	11,5	300	0,092	0,587
	]13,2 - 16,6]	14,9	201	0,062	0,649
	]16,6 - 20]	18,3	188	0,058	0,707
Classe 1	]20 - 40]	30	711	0,219	0,926
	]40 - 60]	50	141	0,044	0,970
	]60 - 80]	70	85	0,026	0,996
	]80 - 100]	90	14	0,004	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

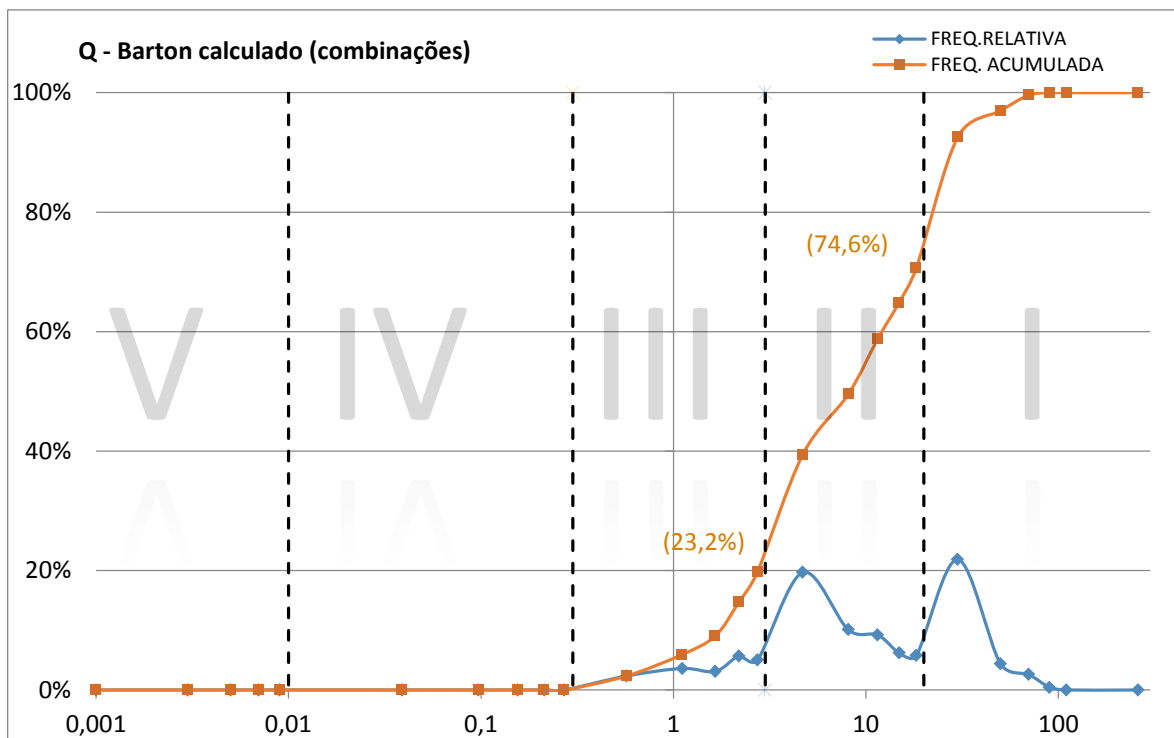


Fig. 5.52 - Gráfico de frequências obtido a partir dos 3252 valores de Q - Barton calculados

Como se pode aferir pela comparação dos gráficos da Figura 5.51 e 5.52 nota-se uma ligeira translação para a direita, na zona limite entre as classes I e II, da linha correspondente às frequências relativas obtida pelos valores de Q - Barton calculados. Esta translação sugere que os valores de Q - Barton estimados em obra nas secções de classe II perto do valor limite de mudança para classe superior (Q - Barton > 20), de forma geral aumentariam para valores de maciço de classe I. De forma idêntica, repara-se que a frequência relativa dos valores da zona de pico, próximos do valor limite, inseridos na classe III diminuem, com o consequente aumento, no gráfico da Figura 5.52, da frequência relativa da zona de pico pertencentes à classe II. Na Tabela 5.4 apresentam-se os valores percentuais de cada classe obtidos de forma estatística a partir da análise dos dois gráficos, para os 48 valores de Q estimados em obra e para os 3252 calculados pela combinação de parâmetros.

Tabela 5.4 - Percentagem da amostragem organizada por classe de maciço para os valores de Q - Barton estimados em obra e calculados pela combinação de parâmetros

Classe	Q - Barton estimado (obra)	Q - Barton calculado (combinação)
Classe 1	0,00%	25,40%
Classe 2	64,00%	51,40%
Classe 3	33,05%	23,20%
Classe 4	2,95%	0,00%
Classe 5	0,00%	0,00%

5.4. QUANTIFICAÇÃO DOS ERROS E INCERTEZAS DA PARAMETRIZAÇÃO DO Q - BARTON

Numa obra subterrânea, são inúmeras as consequências associadas a uma má classificação do maciço rochoso. Tomando valores bastante conservativos estas são, de forma geral, de carácter económico sob a forma de custos de tratamento geotécnico, equipamento, mão-de-obra e sob a forma de avanços mais lentos a quais também estão associados custos. Enquanto que classificações otimistas em demasia podem resultar na rotura da estrutura subterrânea e consequentemente atrasos, acréscimo de custos e num pior cenário, acidentes de trabalho. A classificação ideal é aquela que traduz, de facto, a qualidade do maciço rochoso minimizando os custos e o tempo de execução sem nunca comprometer a estrutura. Isto só é possível se os parâmetros forem definidos cuidadosamente e com um grau de certeza elevado.

A avaliação das condições geológico-geotécnicas em frente de obra passa pela condição incontornável da experiência do técnico que faz essa avaliação. A minimização dos erros inerentes a esta condição humana exige uma maior experiência profissional do técnico da frente de obra e, se possível, que esta avaliação seja feita em conjunto por mais que um técnico – diminuição da subjetividade.

De forma a verificar as consequências associadas aos erros e incertezas na obtenção dos parâmetros do sistema do Q - Barton, numa dada obra cujas estatísticas globais fossem representadas pelos 48 avanços estudados, procedeu-se a quantificação destes segundo uma análise de dias de trabalho e uma análise de custos de tratamentos. Nesta análise foram utilizados os dados reais dos avanços dos túneis de adução da obra, assim como os custos dos tratamentos geotécnicos aplicados em cada classe de maciço rochoso.

5.4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AVANÇOS EM ESCAVAÇÃO SUBTERRÂNEA EM TÚNEL.

A escavação dos túneis de adução foi realizada de acordo com a metodologia NATM definida em projeto para todas as frentes de escavação subterrânea.

Um avanço na escavação dos túneis compreende várias tarefas no processo executivo que, resumidamente, se organizam em ciclos repetitivos com início, arbitrário, em: (i) remoção do escombros, a que se segue (ii) saneamento mecânico com martelo hidráulico, (iii) lavagem / saneamento hidráulico, (iv) saneamento manual, (v) levantamento topográfico, (vi) cartografia geológica, (vii) tratamento geotécnico, (viii) furação para pega de fogo, (ix) carregamento da pega e disparo.

Na caracterização do avanço das escavações foram considerados os dados reais da escavação subterrânea em túneis, num total de cerca de 2500 avanços, repartidos pelos seis túneis e por três classes de maciço rochoso, conforme se resume na Tabela 5.5.

Cada túnel foi desmontado a partir de 2 túneis de ataque, um localizado a jusante e outro a montante. De cada um destes túneis de ataque desenvolveram-se frentes de desmonte dos túneis de adução do circuito hidráulico para jusante e para montante (Figura 5.53).

Tabela 5.5 - Síntese dos dados utilizados para caracterizar o avanço em escavação subterrânea em túnel

Número de túneis do circuito de adução		6 Túneis
Referencias dos túneis		TA01, TA02, TA03, TA04, TA05, TA06
Número de frentes de desmonte dos túneis		4 frentes x 6 túneis
Geologia dos túneis		Gnaisses anfibolíticos
Referência das frentes de desmonte dos túneis	Túnel de ataque montante	E - Sentido montante; C - Sentido jusante
	Túnel de ataque jusante	B - Sentido montante; A - Sentido jusante
Avanços em classe I	-	0 avanços / 0 metros
Avanços em classe II	Abóbada (70 m2)	1198 avanços / 4541 metros
	Secção total (103 m2)	758 avanços / 4314 metros
Avanços em classe III	Abóbada (70 m2)	338 avanços / 1367 metros
	Secção total (103 m2)	198 avanços / 1046 metros
Avanços em classe IV	Abóbada (70 m2)	11 avanços / 40 metros
Avanços em classe V	-	0 avanços / 0 metros

Conforme se pode inferir a partir dos dados da Tabela 5.5 o avanço médio na escavação dos túneis de adução foi calculado tendo em conta as seguintes condições:

- Maciço rochoso com diferentes classificações geomecânicas: foi desmontado maciço em classe II (78.2%), em classe III (21.4%) e em classe IV (0.4%); não foi desmontado maciço rochoso, nem de classe I, nem de classe V;
- Diferentes métodos de desmonte: as frentes de desmonte desenvolvidas a partir do túnel de ataque montante foram executadas em secção total; as frentes de desmonte desenvolvidas a partir do túnel de ataque jusante foram executadas em duas fases: numa primeira fase desmontou-se a abóbada e parte dos hasteias e numa segunda fase fez-se o rebaixo para a secção total. A segunda fase não foi contabilizada na caracterização dos avanços;
- Não foram considerados os avanços que correspondem a sequências anormais no desenvolvimento das tarefas nas frentes de obra em túnel. Contam-se, como exemplo, os avanços que foram afetados por períodos de férias ou por paragens forçadas da produção.



Fig 5.53 - Gráficos com a evolução da escavação em cada um dos túneis de adução, assinalando com cores diferentes a classe de maciço rochoso de cada avanço. Para o túnel TA01 identifica-se o esquema de frentes de desmonte que foi estabelecido para todos os túneis

Na caracterização dos avanços dos túneis de adução optou-se por considerar o avanço em função da classificação do maciço rochoso. O método utilizado para executar o desmonte – em secção total ou em secção parcial – foi considerado com uma característica intrínseca da amostragem.

Para cada uma das classes de maciço rochoso foram considerados os seguintes dados:

- i) o número de avanços;
- ii) o número de dias entre dois avanços consecutivos;
- iii) os metros de desmonte em cada avanço.

Com bases nestes dados calculou-se:

- i) o avanço médio por dia, em metros / dia
- ii) o comprimento de cada avanço, em metros / avanço
- iii) a duração de cada avanço, em dias / avanço

Na caracterização do avanço para maciços de classe I, não dispondo de dados reais relativos à obra estudada, foi considerado por cada avanço 1,5 dias de duração e 4,53 metros de comprimento (valor conservativo igual ao comprimento de cada avanço de classe II).

Os dados globais apresentam-se na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Caracterização dos avanços em escavação subterrânea em túnel

CLASSE	AVANÇO MÉDIO POR DIA	COMPRIMENTO DE CADA AVANÇO	DURAÇÃO DE CADA AVANÇO
	metros / dia	metros / avanço	dias / avanço
CLASSE I	3,02	4,53	1,50
CLASSE II	1,83	4,53	2,47
CLASSE III	1,42	4,50	3,16
CLASSE IV	0,99	3,61	3,64
CLASSE V	-	-	-

5.4.2. CARACTERIZAÇÃO DO CUSTO DOS TRATAMENTOS GEOTÉCNICOS

De forma a comparar as consequências, a nível económico, dos 48 casos de amostragem classificados segundo dois conjuntos de índices Q - Barton obtidos a partir de diferentes parametrizações (Q - Barton estimado em obra e Q - Barton calculado pela combinação dos parâmetros obtidos no Capítulo 3), procedeu-se à caracterização dos custos geotécnicos associados a cada classe do maciço.

Os custos apresentados nas Tabelas 5.7 a 5.11 foram definidos para 10 metros de avanço, em cada classe, segundo os tratamentos aplicados no circuito hidráulico em estudo presentes nas Figuras 3.18 a 3.22 respetivamente, estas englobam os custos do suporte e drenagem do maciço rochoso.

Não se inclui nesta análise os preços associados à mão-de-obra, maquinaria, ou qualquer preço associado à aplicação dos tratamentos geotécnicos, devido à imprevisibilidade e grande variabilidade destes custos. Considera-se que os custos indiretos sejam refletidos, de algum modo, no aumento de tempo necessário à execução dos tratamentos geotécnicos aplicados.

Tabela 5.7 - Custos de tratamentos geotécnicos para 10 metros de avanço em maciço classe I

Classe	Item	Unidades	Quantidades para 10 m	Preços unitários	Preço Total
Classe I	Pregagens (abóbada) ($\Phi 25\text{mm}$, L=4m, $F_y=500\text{ Mpa}$, eventual=a cada 4 m)	ml	30,00	58,00 €	1 740,00 €
	Betão projetado (Com reforço de fibras, e=8cm, Taxa de fibra=30Kg/m ³)	m ³	22,82	870,00 €	19 849,92 €
	Barbacã ($\Phi 50$, L=0,50m)	ml	0,50	60,00 €	30,00 €
	Furo de drenagem ($\Phi 50\text{mm}$, L=2m, Malha 2,5*2,5 m)	ml	96,00	30,00 €	2 880,00 €
	TOTAL				24 499,92 €

Tabela 5.8 - Custos de tratamentos geotécnicos para 10 metros de avanço em maciço classe II

Classe	Item	Unidades	Quantidades para 10 m	Preços unitários	Preço Total
Classe II	Pregagens (abóbada) ($\Phi 25\text{mm}$, L=4m, $F_y=500\text{ Mpa}$, a cada 2,3 m)	ml	121,74	58,00 €	7 060,87 €
	Betão projetado (Com reforço de fibras, e=8cm, Taxa de fibra=30Kg/m ³)	m ³	22,82	870,00 €	19 849,92 €
	Barbacã ($\Phi 50$, L=0,50m)	ml	1,00	60,00 €	60,00 €
	Furo de drenagem ($\Phi 50\text{mm}$, L=2m, Malha 2,5*2,5 m)	ml	96,00	30,00 €	2 880,00 €
	TOTAL				29 850,79 €

Tabela 5.9 - Custos de tratamentos geotécnicos para 10 metros de avanço em maciço classe III

Classe	Item	Unidades	Quantidades para 10 m	Preços unitários	Preço Total
Classe III	Pregagens (abóbada) ($\Phi 25\text{mm}$, L=4m, $F_y=500\text{ Mpa}$, a cada 1,7 m)	ml	235,29	58,00 €	13 647,06 €
	Betão projetado (Com reforço de fibras, e=8cm, Taxa de fibra=30Kg/m ³)	m ³	22,82	870,00 €	19 849,92 €
	Barbacã ($\Phi 50$, L=0,50m)	ml	1,50	60,00 €	90,00 €
	Furo de drenagem ($\Phi 50\text{mm}$, L=2m, Malha 2,0*2,0 m)	ml	140,00	30,00 €	4 200,00 €
	TOTAL				37 786,98 €

Tabela 5.10 - Custos de tratamentos geotécnicos para 10 metros de avanço em maciço classe IV

Classe	Item	Unidades	Quantidades para 10 m	Preços unitários	Preço Total
Classe IV	Pregagens (secção total) ($\Phi 25\text{mm}$, L=4m, $F_y=500\text{ Mpa}$, a cada 1,4 m)	ml	571,43	58,00 €	33 142,86 €
	Betão projetado (normal, e=15cm)	m ³	42,78	810,00 €	34 651,80 €
	Tela metálica (10x10cm, $\Phi 4,2\text{ mm}$, $f_y=600\text{MPa}$)	m ²	285,20	15,00 €	4 278,00 €
	Barbacã ($\Phi 50$, L=0,50m)	ml	2,00	60,00 €	120,00 €
	Furo de injeção ($\Phi 50\text{mm}$, L=3m, Malha 2,0*2,0 m)	ml	210,00	40,00 €	8 400,00 €
	Betão armado estrutural (C30/37 A400)	m ³	486,50	400,00 €	194 600,00 €
	TOTAL				275 192,66 €

Tabela 5.11 - Custos de tratamentos geotécnicos para 10 metros de avanço em maciço classe V

Classe	Item	Unidades	Quantidades para 10 m	Preços unitários	Preço Total
Classe V	Pregagens (secção total) ($\Phi 32\text{mm}$, L=4m, $F_y=500\text{ Mpa}$, a cada 1,0 m)	ml	1120,00	58,00 €	64 960,00 €
	Betão projetado (normal, e=30cm)	m3	85,56	810,00 €	69 303,60 €
	Tela metálica (10x10cm $\Phi 4,2\text{ mm}$ $f_y=600\text{MPa}$)	m2	285,20	15,00 €	4 278,00 €
	Cambota treliçada	un	10	5500,00 €	55 000,00 €
	Barbacã ($\Phi 50$, L=0,50m)	ml	2,50	60,00 €	150,00 €
	Furo de injeção ($\Phi 50\text{mm}$, L=3m, Malha 2,0*2,0 m)	ml	210,00	40,00 €	8 400,00 €
	Betão armado estrutural (C30/37 A400)	m3	469,21	400,00 €	187 684,00 €
TOTAL					389 775,60 €

5.4.3. ANÁLISE DO TEMPO DE EXECUÇÃO E CUSTO DOS TRATAMENTOS GEOTÉCNICOS

Chegou-se à conclusão que os valores do índice Q - Barton obtidos pela combinação dos parâmetros calculados no Capítulo 4 indicavam, de forma global, maciços de melhor qualidade do que a prevista em obra para a amostragem estudada. De forma a quantificar essa melhoria, comparou-se as percentagens globais de classe do maciço obtidas estatisticamente para os dois conjuntos de índice Q - Barton representativos da mesma amostragem presentes na Tabela 5.4, com o número de avanços por classe, respetivos dias de trabalho e custo dos tratamentos geotécnicos.

O número de dias de trabalho para os 48 avanços estudados, foi calculado multiplicando o número de avanços por classe de maciço (amostragem) pelo valor médio do número de dias de trabalho por cada avanço (definido por classe na Tabela 5.6). O custo dos tratamentos geotécnicos foi obtido, para cada classe, através da relação entre o custo dos tratamentos aplicados (caracterizados para 10m de avanço por classe nas Tabelas 5.7 a 5.11), e o comprimento total da amostragem por cada classe de maciço.

Na Tabela 5.12 e 5.13 apresentam-se respetivamente, para os 48 valores de Q - Barton estimados em obra e para os 3252 valores de Q - Barton calculados, o número estatístico de avanços em cada uma das cinco classes de qualidade, os respetivos dias de trabalho necessários, e o respetivo custo do tratamento geotécnico aplicado

Tabela 5.12 - Número de dias de trabalho e custo dos tratamentos geotécnicos definido por classe de qualidade de maciço para os 48 casos de estudo classificados pelo técnico de frente de obra

Q de Barton (Obra) - geólogo								
Classe	Nº de avanços (amostra)	%	Dias por avanço	Dias de trabalho	Metros por avanço	Metros por classe (amostra)	Custo do tratamento geotécnico (10 m de avanço)	Custo do tratamento geotécnico (amostra)
Classe I	0,00	0,00	1,50	0,00	4,53	0,00	24 499,92 €	0,00 €
Classe II	30,72	64,00	2,47	76,00	4,53	139,08	29 850,79 €	415 175,83 €
Classe III	15,86	33,05	3,16	50,20	4,50	71,43	37 786,98 €	269 904,67 €
Classe IV	1,42	2,95	3,64	5,15	3,61	5,11	275 192,66 €	140 636,46 €
Classe V	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	389 775,60 €	N/A
Total	48,00	100,00		131,34				825 716,95 €

O tratamento geotécnico das quarenta e oito secções estudadas de terminado pelo Q – Barton determinado nas frentes de obra - Q - Barton obra - demorou efetivamente, em obra, 131,34 dias e teve um custo direto de 825 716,95 € conforme se pode ver na Tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Número de dias de trabalho e custo dos tratamentos geotécnicos definidos por classe de qualidade de maciço, para os 48 casos de estudo classificados através da combinação dos parâmetros calculados

Q de Barton Calculado								
Classe	Nº de avanços (amostra)	%	Dias por avanço	Dias de trabalho	Metros por avanço	Metros por classe (amostra)	Custo do tratamento geotécnico (10 m de avanço)	Custo do tratamento geotécnico (amostra)
Classe I	12,19	25,40	1,50	18,29	4,53	55,23	24 499,92 €	135 312,47 €
Classe II	24,67	51,40	2,47	60,94	4,53	111,70	29 850,79 €	333 438,09 €
Classe III	11,14	23,20	3,16	35,19	4,50	50,14	37 786,98 €	189 464,09 €
Classe IV	0,00	0,00	3,64	0,00	3,61	0,00	275 192,66 €	0,00 €
Classe V	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	389 775,60 €	N/A
Total	48,00	100,00		114,42				658 214,65 €

Se o tratamento geotécnico das quarenta e oito secções estudadas fosse determinado com base nos valores do Q - Barton calculados de modo objetivo como expostos neste trabalho – com base num Q - Barton calculado – demoraria 114,42 dias com um custo associado de teve um custo de 658 214,65 € conforme se pode ver na Tabela 5.13.

Analisando as duas tabelas apresentadas em cima, depara-se com uma diferença, sobre a mesma amostra, de aproximadamente 17 dias de trabalho e 167.500 € entre os dois métodos de classificação. Esta diferença traduz-se numa poupança total de cerca de 12,9% dias de trabalho e 20,0% em custos de tratamentos geotécnicos, caso os parâmetros associados à classificação de Q - Barton fossem obtidos e estudados estatisticamente da mesma forma que foi efetivada neste trabalho.

Comparando os valores dos dias de trabalho das Tabelas 5.12 e 5.13 pode-se concluir que, de uma forma geral, economiza-se 12,9% do tempo de trabalho devido essencialmente à presença maciços de classe I avaliados como classe II e à presença de maciços de classe II avaliados como classe III. Comparando o custo do tratamento geotécnico, a diferença de 20% entre a amostragem classificada em obra e a mesma amostragem classificada no presente trabalho, advém maioritariamente da presença, ainda que pouco, de maciços classe III classificados como classe IV. O custo de tratamentos aplicados à classe IV e V, devido à diminuição da secção hidráulica, é da ordem das 9-10 vezes maior que as restantes classes.

A diferença de valores é bastante grande se for pensada como percentagens relativas a um circuito hidráulico que fosse representado pela amostragem em causa. Esta tende, no entanto, a ser maior visto que fatores como atrasos (mais suscetíveis de acontecer em classe de maciço mais altas) não foram contabilizados nos dias de trabalho, assim como os custos associados à mão de obra, maquinaria e outros custos diretamente relacionados com o número de dias de trabalho não foram contabilizados a nível económico.

Considera-se que esta diferença de valores está subjacente ao erro e incerteza associado à parametrização do sistema do Q - Barton, particularmente nos quarenta e oito casos estudados, mas que é representativo para uma obra subterrânea que, de forma global, seja representado por as características gerais da amostragem.

5.5. CONCLUSÕES

Ao analisarmos particularmente ou de forma global os valores do índice de qualidade Q - Barton, verificamos que os valores obtidos são maioritariamente superiores aos valores estimados em obra, devido essencialmente, a problemas na estimativa dos parâmetros caracterizantes do maciço rochoso pelos técnicos da frente.

A partir dos quarenta e oito avanços estudados e classificados particularmente segundo, não um só, mas uma gama de valores do índice Q - Barton representativos de cada secção, constatou-se que cerca de 29% das secções da amostragem poderiam ser classificadas como maciços de classe inferior à adotada. Apesar de esta amostragem não ser representativa dos túneis do circuito hidráulico da obra em que se inserem, sugere uma atitude bastante conservadora na classificação e respetivo tratamento dos maciços rochosos por parte dos técnicos da obra estudada. Inclusivamente foram calculadas bastantes secções com valores de Q - Barton quase 100% em classe I, e no entanto em obra não foram definidos maciços com esta classe de qualidade.

De forma global, ao analisar estatisticamente os 48 valores de índice Q - Barton estimados, comparativamente com o conjunto de 3252 valores de Q - Barton calculados pela combinação dos seis parâmetros obtidos neste trabalho, deparamo-nos com uma descida bastante significativa da percentagem da amostragem classificada como classe IV, III e II com um consequente aumento para cerca de 25% de classe de maciço I.

Estudando as consequências associadas a esta disparidade de valores, concluiu-se que eram economizados cerca de 12,9% de dias de trabalho e 20% relativamente ao custo do tratamento geotécnico dos quarenta e oitos avanços estudados. Ambos os valores são bastante altos tendo em

conta o tempo e custos associados a uma obra subterrânea deste tipo, e sublinham a importância de uma análise cuidada e objetiva dos parâmetros de base da classificação de Q - Barton, mas também das outras classificações geomecânicas.

Concluiu-se assim que adotando, para os parâmetros geotécnicos, intervalos de valores segundo critérios bem definidos em vez de valores singulares revela-se mais vantajoso permitindo fazer um julgamento estatístico dos dados e suas tendências, minimizando os erros e incertezas a que estes estão sujeitos. Pela combinação de todos os parâmetros obtidos, é possível chegar a um vasto conjunto de índices de qualidade Q - Barton representativos do mesmo maciço. Estudando estes dados é possível visualizar a variação e distribuição de valores por classe, valores máximos, mínimos e médios, permitindo um julgamento mais rigoroso e consequentemente uma classificação com menos incertezas.

6

**CONSIDERAÇÕES
FINAIS****6.1. CONCLUSÕES DO TRABALHO REALIZADO**

Uma vez que o trabalho incidiu sobre a classificação de maciços rochosos com base no índice do Q - Barton – no estudo detalhado e estatístico dos parâmetros de base deste índice – este permitiu aprofundar o conhecimento, não só deste sistema, mas também de outros sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos utilizados na avaliação da qualidade do maciço e no correspondente dimensionamento do tratamento geotécnico.

Pelo facto de o estudo ter como base dados pertencentes a um circuito hidráulico de um aproveitamento hidroelétrico em fase de construção, este permitiu ganhar noções do trabalho dos técnicos de obra e de todo trabalho por trás da classificação de um maciço rochoso e da metodologia subjacente.

O maior desafio colocado durante o desenvolvimento deste trabalho consistiu na necessidade de encontrar metodologias para a determinação, de modo o mais objetivo e quantificado possível, cada um dos parâmetros de base do Q - Barton.

Para objetivar o cálculo do RQD – Índice de Qualidade da Rocha utilizou-se metodologias já publicadas e testadas: na frente de obra implementou-se a utilização de três métodos alternativos com base na contagem de descontinuidades;

Para o cálculo do J_r – Índice de Rugosidade das Descontinuidades, utilizou-se a correlação, publicada e amplamente aceite, entre as características de regularidade e rugosidade das descontinuidades e os valores de J_r ; para este estudo introduziu-se a inovação de tratar esta correlação de modo estatístico, aplicando-a um conjunto de descontinuidades representativas de toda a frente de desmonte, evitando a subjetividade de escolher as características de uma só família ou de uma única descontinuidade; de acordo com as instruções do Projeto, não foi adotado o critério de Barton de utilizar a descontinuidade mais penalizante;

Para o cálculo do J_n – Índice de Famílias de Descontinuidades, adotou-se uma metodologia que define o número de famílias com base no tratamento estatístico de um conjunto de descontinuidades representativas da frente de escavação; esta metodologia criou a necessidade de se estabelecerem critérios objetivos para a identificação de uma família de descontinuidades num estereograma de isodensidades de pólos.

Para o cálculo do J_a – Índice de Alteração das Descontinuidades, desenvolveu-se uma tabela inédita de correlação entre as propriedades das descontinuidades representativas da frente de escavação – Tipo de descontinuidade, Rugosidade, Tipo de contacto, Abertura e Alteração – e os valores de J_a .

Em todos os cálculos estatísticos testou-se a consideração das descontinuidades em 5 metros ou em 10 metros de frente de obra.

As metodologias adotadas para o cálculo dos parâmetros RQD, J_n , J_r e J_a revelaram-se adequadas na determinação do Q - Barton permitindo gerar valores estatisticamente válidos.

Dos resultados obtidos, concluiu-se que, de uma maneira geral os parâmetros estimados em obra, dos quarenta e oito avanços estudados, eram substancialmente conservativos levando a subestimar a qualidade do maciço rochoso e o suporte utilizado.

Obteve-se um valor de 29 % dos avanços estudados com uma probabilidade bastante consistente de serem dimensionados para a classe abaixo da que foi adotada em obra. Este valor é bastante elevado e, apesar de não se poder alargar as conclusões da amostragem ao circuito hidráulico estudado, sugere uma atitude bastante conservadora na atribuição dos parâmetros com consequências importantes a nível de custos e dias de trabalho.

Generalizando o estudo a uma obra cujas características globais fossem representadas pela amostragem, obteve-se valores estatísticos do Q - Barton de maciços de classe inferior em cerca de 25 % dos valores.

Analisando as consequências na execução de uma obra genérica com o mesmo tratamento geotécnico e avanço de escavação que o circuito hidráulico estudado, deparamo-nos com valores que podemos considerar “em excesso” de cerca de 12,9 % dias de trabalho e 20% de custos de tratamentos geotécnicos aplicados. Considera-se estes valores bastante elevados, se pensarmos na dimensão e custos associados a uma obra deste tipo, e consequência de uma má caracterização do maciço rochoso.

Por fim, e com base nas conclusões retiradas deste trabalho, pode-se afirmar que colocando dois técnicos na frente de obra – por exemplo, um geólogo júnior e um geólogo sénior –, a efetuar o estudo estatístico que se apresentou neste trabalho ao longo da escavação de uma obra subterrânea, consegue-se uma classificação mais consistente, segura e com menos incertezas na caracterização das propriedades do maciço; esta opção é viável economicamente pois o custo do segundo técnico é suportado pela redução dos custos do sobredimensionamento e dias de trabalho desnecessários.

A presença de um segundo técnico na frente de obra também contribui para a minimização do erro humano na apreciação de situações de risco geotécnico.

6.2. SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Um trabalho semelhante ao que foi desenvolvido deve ser replicado para outros túneis, em maciços com litologias diferentes. Os túneis que serviram de base a este trabalho foram construídos integralmente em gnaiss, sugere-se estender o estudo a maciços xistentos, calcários ou mesmo rochas sedimentares mais brandas.

A amostragem utilizada englobou, de um modo geral, maciços rochosos de qualidade mediana classificados essencialmente como classe II e classe III. Poderá ser estudada, em desenvolvimentos futuros, a influência de maciços de melhor qualidade classificados como classe I, e de maciços de má e muito má qualidade classificados como classe IV e V, num trabalho semelhante ao efetuado.

Neste estudo não foram tratados os parâmetros J_w – Índice das Condições Hidrogeológicas e SRF – Stress Reduction Factor. Em futuros desenvolvimentos será pertinente introduzir procedimentos em obra que permitam a aquisição de dados para o cálculo objetivo destes dois parâmetros.

No estudo realizado não foi feita uma abordagem de análise de risco geotécnico no seu sentido estrito, contudo a análise dos desvios na determinação do índice Q - Barton poderá ser considerada como uma análise do risco. Sugere-se para desenvolvimentos futuros uma avaliação do risco geotécnico, associado a um estudo similar dos parâmetros geotécnicos do Q - Barton.

Pode ser ainda efectuado, como um trabalho futuro, um estudo comparativo entre os métodos utilizados no cálculo de cada parâmetro do Q - Barton com o objectivo de verificar qual se revela mais eficiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mechanics*, 6:189-236, 1974.
- [2] Miranda, T. Classificações Geomecânicas para Maciços Rochosos. Apontamentos de Apoio à Disciplina de Fundações do 4º Ano da Licenciatura em Engenharia Civil. Universidade do Minho, 23 pp., 2006.
- [3] FEUP. Classificação de Maciços Rochosos. Apontamentos da Disciplina de Geologia de Engenharia. FEUP, 25 pp., 2011.
- [4] Melo, M. M. Caracterização e Compartimentação Geológica e Geomecânica de Maciço Basáltico Heterogêneo, Aplicados a Engenharia (Dissertação de mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 160 pp., 2010.
- [5] Hoek, E., Kaiser, P.K. & Bawden, W. F. Support of Underground Excavations in Hard Rock. CRC Press, Nova York, 213 pp., 2010.
- [6] Marinos, P.G., Marinos, V. & Hoek, E. The Geological Strength Index (GSI). A Characterization Tool for Assessing Engineering Properties of Rock Masses. In: *Underground Works under Special Conditions - Proceedings of the Workshop (W1) on Underground Works under Special Conditions*, Taylor & Francis, pp. 13-21, 2007.
- [7] <https://www.eoas.ubc.ca/courses/eosc547/lecture-material/Part1-SupplementaryNotes.pdf>; (acedido em 2/08/2016).
- [8] Hoek, E. 1994. Strength of Rock and Rock Masses, *ISRM News Journal*, 2(2), 4-16.
- [9] Marinos, P. & Hoek, E. Estimating the Geotechnical Properties of Heterogeneous Rock Masses such as Flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60:85-92, 2001.
- [10] N. Barton, N. & Grimstad, E. Q-System - An Illustrated Guide Following Forty Years in Tunnelling. <http://www.nickbarton.com>, 44 pp., 2014.
- [11] Grimstad, E. & Barton, N. Updating of the Q-system for NMT. In: *Kompen, C., Opshll, S.L. & Berg, S.L. (Editors), Proceedings of International Symposium of Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support*, Fagernes. Norwegian Concrete Association, Oslo, pp. 163-177, 1993.
- [12] Grimstad, E., Kankes, K., Bhasin, R., Magnussen, A. & Kaynia, A. Rock mass quality Q used in designing reinforced ribs of sprayed concrete and energy absorption. In: *Proceedings of International Symposium of Sprayed Concrete*, pp: 36-66, Davos, 2002.
- [13] Barton, N. & Grimstad, E. The Q-System following thirty years of development and application in tunneling projects. *Proceedings ISRM, EUROROCK 2004*, Salzburg, Austria, pp., 15-18, 2004.
- [14] NGI. Using the Q-system, Rock Mass Classification and Support Design. (<http://www.ngi.no>). Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, 2013.
- [15] Palmstrom, A. & Broch, E. Use and misuse of rock mass classification systems with particular reference to the Q-System. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21:575-593, 2006.
- [16] Deere, D.U. Technical description of rocks cores for engineering purposes. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, 1:16-22, 1963.

- [17] Palmstrom, A. Measurements of and correlations between block size and Rock Quality Designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20:362-377, 2005.
- [18] Singh, B. & Goel, R. K. *Engineering Rock Mass Classification*. Elsevier, Amsterdam, 384 pp., 2011.
- [19] Deere, D.U., Hendron, A.J., Jr., Patton, F.D. & Cording, E.J. Design of surface and near-surface construction in rock. In: Fairhurst, C., (Editor), *Failure and Breakage of Rock*. Society of Mining Engineers of AIME, pp. 237-302, New York, 1967.
- [20] FEUP, 2015. *Classificações para Fins de Engenharia. Apontamentos da disciplina de Obras Subterrâneas*. FEUP, 2015.
- [21] Barton, N. *TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock*. A. A Balkema, Rotterdam, 173 pp., 2000.
- [22] Barton, N. Quantitative Description of Rock Masses for the Design of NMT Reinforcement. In: *International Conference on Hydropower Development in Himalayas*, pp. 379-400, Shimla, 1998.
- [23] Barton, N. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, pp 185-216, 2002.
- [24] Barton, N. & Bieniawski, Z.T. RMR and Q-setting records straight. *Tunnels and Tunnelling*

Anexos

ANEXO A
GEOLOGIA E GEOTECNIA
(TÚNEIS DE ADUÇÃO)

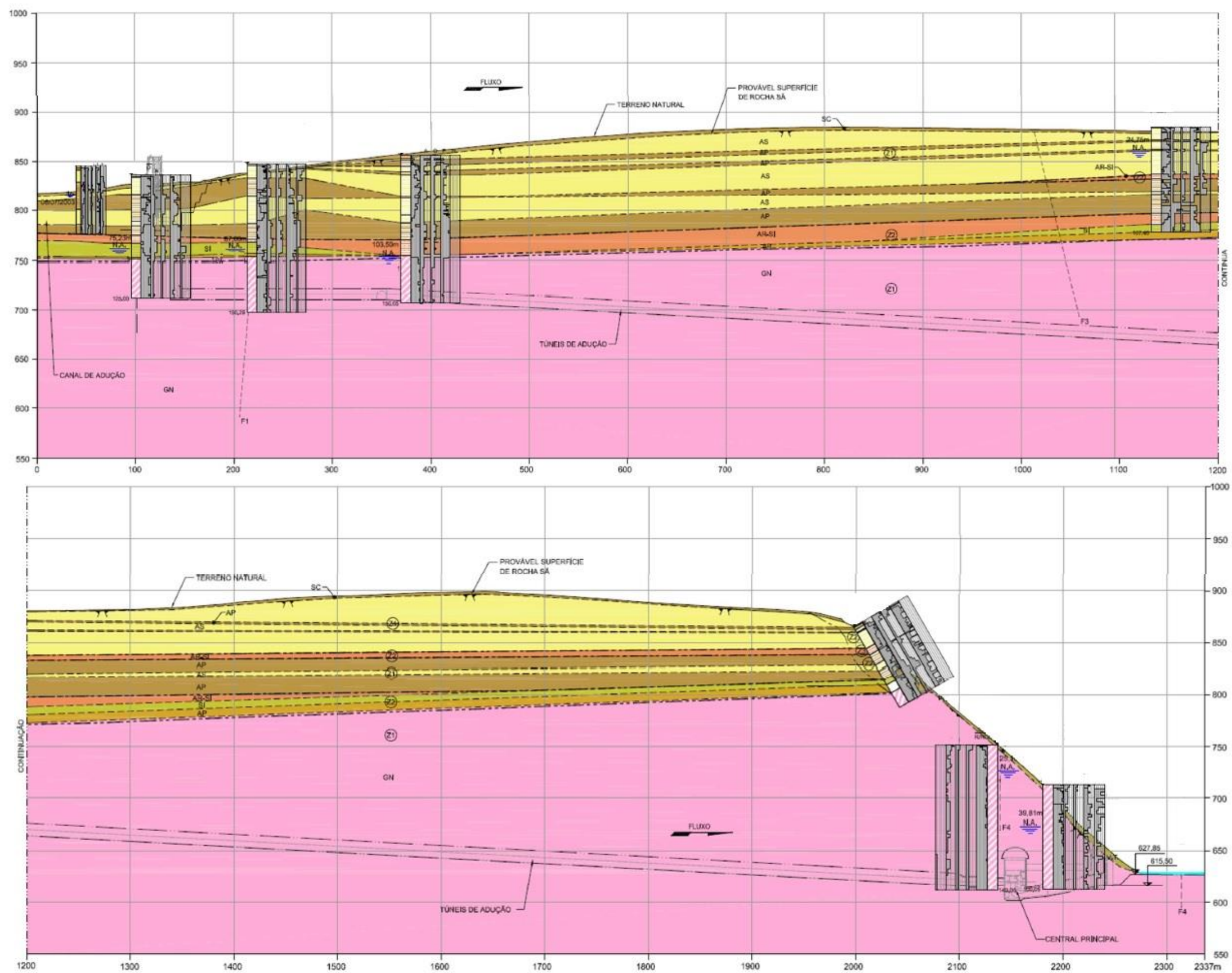


Fig. A1 – Secção Geológica – Túneis de adução

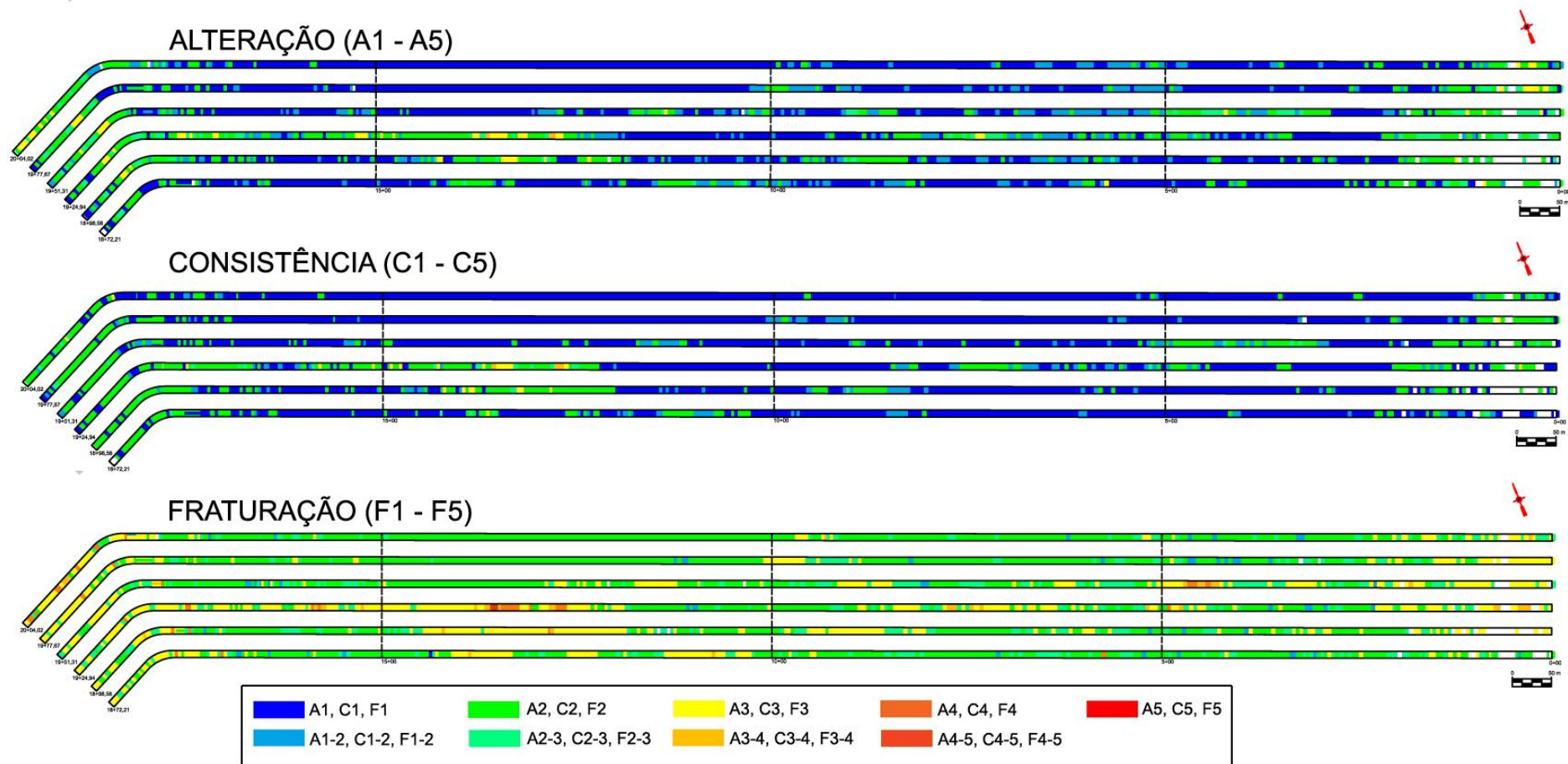


Fig. A2 - Características do maciço rochoso gnáissico dos túneis de adução.

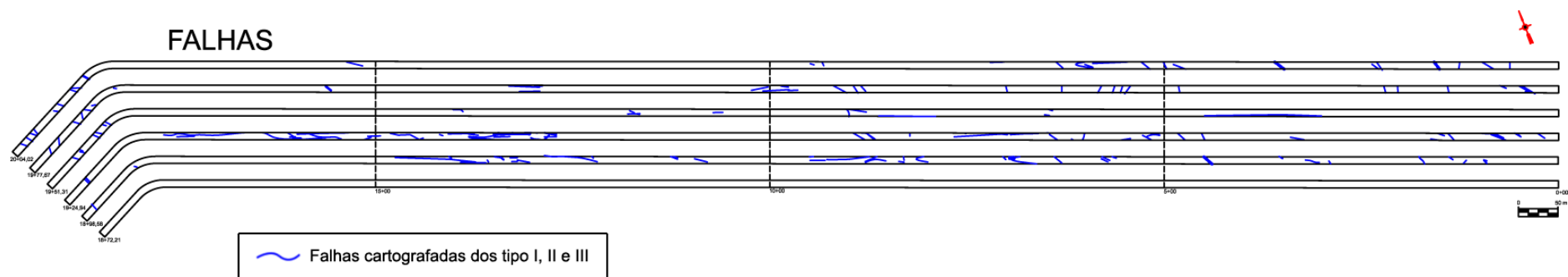


Fig. A3 - Falhas cartografadas dos tipos I, II e III nos túneis de adução.

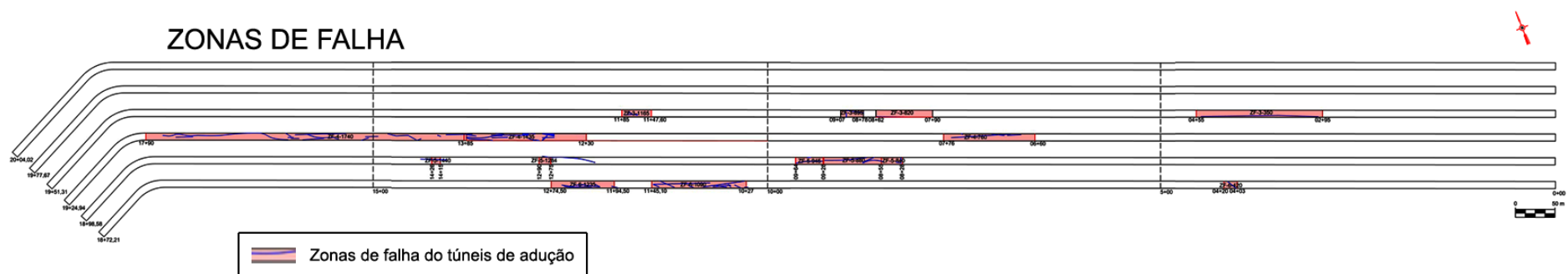


Fig. A4 - Zonas de falha definidas nos túneis de adução.

Tabela A1 – Parâmetros da classificação de Barton, índice Q e Classe de maciço estimados em obra

Túnel/frente	Progressiva	RQD	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q-Barton	CLASSE
TA1 B	0+871.70 a 0+875.60	80	12	1,5	1	1	1	10,00	II
TA1 B	0+961.90 a 0+966.10	70	12	1	2	1	1	2,92	III
TA1 B	1+285.50 a 1+288.30	85	9	1,5	0,75	1	1	18,89	II
TA1 B	1+370.70 a 1+373.80	80	9	1,5	0,75	1	1	17,78	II
TA1 B	1+384.80 a 1+388.50	85	9	1,5	0,75	1	1	18,89	II
TA1 C	0+825.00 a 0+831.00	90	9	1,5	1	1	1	15,00	II
TA2 B	1+006.80 a 1+010.90	70	12	1,5	3	1	1	2,92	III
TA2 B	1+329.40 a 1+331.50	85	9	1,5	0,75	1	1	18,89	II
TA2 B	1+412.70 a 1+416.60	85	9	1,5	1	1	1	14,17	II
TA2 C	0+342.00 a 0+348.00	90	9	1,5	1	1	1	15,00	II
TA2 C	0+501.50 a 0+506.00	80	9	1,5	1	1	1	13,33	II
TA2 C	0+881.50 a 0+885.50	85	9	3	2	1	1	14,17	II
TA3 B	1+361.70 a 1+365.90	80	9	1,5	0,75	1	1	17,78	II
TA3 B	1+406.10 a 1+410.50	85	9	1,5	1	1	1	14,17	II
TA3 B	1+117.80 a 1+121.10	75	12	1,5	2	1	1	4,69	II
TA3 C	0+692.00 a 0+698.00	80	9	1,5	2	1	1	6,67	II
TA3 C	0+804.00 a 0+810.00	90	9	1,5	1	1	1	15,00	II
TA3 C	0+904.50 a 0+910.50	75	12	1,5	2	1	1	4,69	II
TA4 B	1+005.60 a 1+008.90	80	9	1,5	1	1	1	13,33	II
TA4 B	1+030.70 a 1+034.80	85	9	1,5	1	1	1	14,17	II
TA4 B	1+113.30 a 1+117.40	85	9	1,5	1	1	1	14,17	II
TA4 B	1+201.30 a 1+205.40	75	12	1,5	1	1	1	9,38	II
TA4 B	1+320.20 a 1+323.40	65	12	1	3	1	2,5	0,72	III
TA4 B	1+327.20 a 1+330.40	60	12	1	4	1	5	0,25	IV
TA4 B	1+399.20 a 1+403.10	65	9	1,5	3	1	2,5	1,44	III
TA4 B	1+423.40 a 1+427.30	65	9	1,5	2	1	2,5	2,17	III
TA4 B	1+439.80 a 1+444.50	65	9	1,5	2	0,66	2,5	1,43	III
TA4 B	1+587.40 a 1+591.30	35	15	2	4	0,66	2,5	0,31	III
TA4 C	0+751.50 a 0+757.00	66,5	12	1,5	2	1	2,5	1,66	III
TA4 C	0+757.00 a 0+763.50	50	12	1,5	2	1	2,5	1,25	III
TA4 C	0+770.50 a 0+776.00	65	12	1,5	2	1	2,5	1,63	III
TA4 C	0+867.00 a 0+872.50	70	12	1,5	2	1	1	4,38	II
TA4 C	0+988.00 a 0+994.00	80	9	1,5	1	1	1	13,33	II
TA5 B	0+907.60 a 0+912.00	60	12	2	3	1	1	3,33	II
TA5 B	0+927.70 a 0+930.90	80	9	1,5	2	1	1	6,67	II
TA5 B	0+930.90 a 0+934.70	70	12	1,5	2	1	1	4,38	II
TA5 B	1+142.80 a 1+147.10	80	9	1,5	0,75	1	1	17,78	II
TA5 B	1+304.50 a 1+308.80	70	12	1,5	2	1	2,5	1,75	III
TA5 B	1+345.20 a 1+349.20	75	9	1,5	2	0,66	2,5	1,65	III
TA5 B	1+361.70 a 1+365.30	75	9	1,5	2	1	2,5	2,50	III
TA5 C	0+480.00 a 0+486.00	95	9	1,5	1	1	1	15,83	II
TA5 C	0+564.00 a 0+569.50	80	12	1,5	2	1	1	5,00	II
TA5 C	0+790.00 a 0+796.00	75	9	1,5	1	1	1	12,50	II
TA5 C	0+850.00 a 0+855.50	70	12	1,5	3	1	2,5	1,17	III
TA5 C	0+866.50 a 0+872.50	50	12	1,5	4	1	2,5	0,63	III
TA6 B	1+094.40 a 1+099.10	75	12	1,5	2	1	1	4,69	II
TA6 C	0+701.50 a 0+707.00	90	9	1,5	1	1	1	15,00	II
TA6 C	0+822.50 a 0+829.00	80	9	1,5	1	1	1	13,33	II

ANEXO B

TABELAS DE CAMPO

CARACTERIZAÇÃO DA ALTERAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO						
SÍMBOLO	CLASSIFICAÇÃO	DESCRIÇÃO	ESTADO DE ALTERAÇÃO, ISRM (1981)			
			SIMBOLOGIA		DESCRIÇÃO	
A1	ROCHA SÃ	Matriz e fracturas sem alteração; eventual descoloração das principais descontinuidades	W1	W1-2	Não se observam sinais de alteração da matriz rochosa	- Sã e compacta - Descontinuidades fechadas - Permeabilidade é praticamente nula
A2	ROCHA POUCO ALTERADA	Matriz e fracturas com decomposição incipiente; pode apresentar decomposição ao longo das fracturas	W2		Mudanças na cor original da matriz da rocha (descoloração)	
A3	ROCHA MEDIANAMENTE ALTERADA	Toda a matriz apresenta-se descolorida com evidências de oxidação e argilificação; pode ocorrer material mais alterado ao longo das descontinuidades	W3	W3	Menos de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo, mantendo-se a estrutura original	- Maciço mais ou menos são - Intersectado por descontinuidades abertas
A4	ROCHA MUITO ALTERADA	Alteração mineralógica muito acentuada; cores bastante acentuadas; possível presença de núcleos menos alterados	W4	W4-5	Mais de metade do material rochoso está decomposto e/ou desagregado num solo; a rocha é muito friável	- Zona alterada a muito alterada ou mesmo decomposta - Permeabilidade do tipo intersticial - Pode coexistir uma circulação fissural
A5	ROCHA EXTREMAMENTE ALTERADA / SAPRÓLITO	Todo o material está decomposto para solo; a estrutura da rocha original está preservada	W5		Todo o material rochoso está muito decomposto e/ou desagregado num solo residual	

Fig. B1 - Caracterização da alteração (A) do maciço rochoso

CARACTERIZAÇÃO DA COERÊNCIA / CONSISTÊNCIA DO MACIÇO ROCHOSO						
CONSISTÊNCIA / COERÊNCIA		DESCRIÇÃO	TERMINOLOGIA PARA CARACTERIZAR A RESISTÊNCIA DAS PAREDES DAS DESCONTINUIDADES, ISRM (1978)			
			DESCRIÇÃO		POINT LOAD TEST (MPa)	RESIST. COMP. UNIAXIAL (MPa)
C1	Muito consistente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo; os fragmentos possuem bordas cortantes que resistem ao corte por uma lâmina de aço; superfície dificilmente riscada por uma lâmina de aço	Rocha bastante resistente	Apenas se obtêm lascas percutindo com o martelo de geólogo e ressoa quando batida	> 10	> 250
			Rocha bastante resistente	Para se obterem fragmentos são necessárias muitas pancadas com o martelo de geólogo	4 - 10	100 - 250
C2	Consistente	Quebra com relativa dificuldade ao golpe do martelo; os fragmentos possuem bordas cortantes que podem ser cortadas por lâmina de aço; superfície riscável por lâmina de aço	Rocha muito resistente	Podem-se obter fragmentos, em amostra de mão, dando uma pancada seca com o martelo	2 - 4	50 - 100
C3	Medianamente consistente	Quebra facilmente ao golpe do martelo; as bordas dos fragmentos podem ser quebradas por pressão dos dedos; a lâmina de aço provoca um sulco acentuado na superfície do fragmento	Rocha razoavelmente resistente	Podem-se obter fragmentos com uma pancada seca; é raspada, não podendo ser cortada ou esmigalhada com uma navalha	1 - 2	25 - 50
			Rocha fraca (II)	Marcas superficiais com pancada firme com a ponta do martelo; cortada com dificuldade	< 2	5 - 25
C4	Pouco consistente	Esfarela ao golpe do martelo; desagrega sob pressão dos dedos	Rocha fraca (I)	Desagregada com pancada firme do martelo; pode ser cortada em fatias com um canivete	< 2	1 - 5
C5	Sem consistência / friável	Esfarela facilmente sob pressão dos dedos; dissolve-se completamente quando agitado na água	Rocha muito fraca	Marcada pela unha do polegar	< 2	< 1

Fig. B2 - Caracterização da coerência / consistência (C) do maciço rochoso

CARACTERIZAÇÃO DA FRATURAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO								
SIMBOLO	Nº DE FRACTURAS POR METRO	DESCRIÇÃO	ESTADO DA FRACTURAÇÃO (ISRM, 1978, 1981)			NÚMERO DE FRACTURAS POR FAMÍLIA EM X, Y, Z (Jv, Palmström, 1982)	NÚMERO DE FRACTURAS POR METRO (Priest & Hudson, 1976)	RQD
			SIMBOLOGIA	ESPAÇAMENTO MÉDIO				
F1	<1 fracturas/m	Ocasionalmente fracturada	F1	>200 cm	Muito afastadas	≤4.5	<0.5	100%
F2	1 a 5 fracturas/m	Pouco fracturada	F2	60 - 200 cm	Afastadas	<4.7	<1	100%
						4.9	1.7	99%
F3	6 a 10 fracturas/m	Medianamente fracturada	F3	60 - 20 cm	Medianamente afastadas	7.3	5	91%
F4	11 a 20 fracturas/m	Muito fracturada	F4	20 - 6 cm	Próximas	13.0	10	74%
						19.5	16.6	51%
F5	>20 fracturas/m	Extremamente fracturada	F5	<6 cm	Muito próximas	23.0	20	41%
						>23	>20	<38%

Fig. B3 - Caracterização da fraturação (F) do maciço rochoso










REGULARIDADE, RUGOSIDADE, Jr e JRC								
REGULARIDADE DA SUPERFÍCIE	CLASSE	RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE	DESCRIÇÃO	Jr	JRC ₂₀	JRC ₁₀₀		
IR	IRREGULAR OU EM PATAMARES	I	RG	Rugosa ou irregular, em patamares	4	20	11	EM PATAMARES OU IRREGULAR 
		II	LI	Lisa, em patamares	3	14	9	
		III	ES	Espelhada, em patamares	2	11	8	
ON	ONDULADA	IV	RG	Rugosa ou irregular, em superfície ondulada	3	14	9	ONDULADA 
		V	LI	Lisa, em superfície ondulada	2	11	8	
		VI	ES	Espelhada, em superfície ondulada	1.5	7	6	
PL	PLANAR	VII	RG	Rugosa em superfície plana	1.5	2.5	2.3	PLANA 
		VIII	LI	Lisa em superfície plana	1	1.5	0.9	
		IX	ES	Espelhada em superfície plana	0.5	0.5	0.6	

Fig. B4 - Caracterização da Regularidade / Rugosidade da superfície

TIPO DE CONTACTO ENTRE AS PAREDES DA DESCONTINUIDADE	
SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
P0	Contacto rocha-rocha
P2	Contacto rocha-rocha com presença de fracção granular entre as paredes
P1	Fracção granular entre as paredes
P3	Fracção de solo, argilosa, entre as paredes

Fig. B5 - Caracterização do tipo de contacto (P) entre as paredes das descontinuidades

ABERTURA DAS DESCONTINUIDADES				
SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	TERMINOLOGIA PARA A DESCRIÇÃO DE UMA DESCONTINUIDADE SEM MATERIAL DE PREENCHIMENTO (Adaptado de ISRM, 1978)		
		ABERTURA	DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS
E1	< 1 mm	<0.10 mm	Muito apertada	Descontinuidade fechada: < 0.50 mm
		0.10 - 0.25 mm	Apertada	
		0.25 - 0.50 mm	Parcialmente apertada	
E2	entre 1 e 5 mm	0.50 - 2.50 mm	Aberta	Descontinuidade aberta: 0.50 - 10 mm
E3	entre 5 e 10 mm	2.50 - 10 mm	Razoavelmente aberta	
E4	> 10 mm	> 10 mm	Larga	Descontinuidade muito aberta (fenda): > 10 mm
		10 - 100 mm	Muito larga	
		100 - 1 000 mm	Extremamente larga	
		>1000 mm	Cavernosa	

Fig. B6 - Caracterização da abertura (E) das descontinuidades

ALTERAÇÃO DAS PAREDES DAS DESCONTINUIDADES		
SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS DA ALTERAÇÃO DAS PAREDES DAS DESCONTINUIDADES (Adaptado de ISRM, 1978)
a1	Paredes sãs	Não há sinais de alteração da rocha
ax	Paredes oxidadas	A parede está sã, mas é visível uma "pátina" de oxidação a cobrir parcialmente a superfície
a2	Paredes levemente alteradas (descoloradas)	A cor original da rocha alterou-se. O grau de alteração dessa cor original é variável ao longo das superfícies expostas e pode estar ligado a um constituinte mineral específico
a3	Paredes moderadamente alteradas (decompostas)	O material está decomposto em solo, mas a estrutura do material inicial ainda se mantém intacta apesar de vários minerais se terem já decomposto
a4	Paredes muito alteradas (desintegradas)	O material está decomposto em solo, mas a estrutura do material inicial ainda está presente. A rocha é friável, apesar de alguns dos grãos minerais não estarem decompostos

Fig. B7 - Caracterização da alteração (a) das paredes das descontinuidades

CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇAMENTO DAS DESCONTINUIDADES (f)						
SIMBOLO	Nº DE FRACTURAS POR METRO	DESCRIÇÃO	ESTADO DA FRACTURAÇÃO (ISRM, 1978, 1981)			NÚMERO DE FRACTURAS POR METRO
			SIMBOLOGIA	ESPAÇAMENTO MÉDIO		
f1	<1 fracturas/m	Ocasionalmente fracturada	F1	> 200 cm	Muito afastadas	<0.5
						0.5
f2	1 a 5 fracturas/m	Pouco fracturada	F2	60 - 200 cm	Afastadas	1
						1.7
f3	6 a 10 fracturas/m	Medianamente fracturada	F3	60 - 20 cm	Medianamente afastadas	2
						5
f4	11 a 20 fracturas/m	Muito fracturada	F4	20 - 6 cm	Próximas	6
						10
f5	>20 fracturas/m	Extremamente fracturada				11
						16.6
			F5	<6 cm	Muito próximas	17
						20
						>20

Fig. B8 - Caracterização do espaçamento (f) das descontinuidades

CONTINUIDADE OU PERSISTÊNCIA DAS DESCONTINUIDADES (modificado de ISRM, 1978)		
SÍMBOLO	COMPRIMENTOS MÉDIOS POR FAMÍLIA	PERSISTÊNCIA
L1	< 1m	Muito pouco contínuas
L2	1 - 3 m	Pouco contínuas
L3	3 - 10 m	Continuidade média
L4	10 - 20 m	Continuidade alta
L5	> 20 m	Continuidade muito alta

Fig. B9 - Caracterização da continuidade ou persistência (L) das descontinuidades

ANEXO C
PROJEÇÕES ESTEREOGRÁFICAS
DAS DESCONTINUIDADES

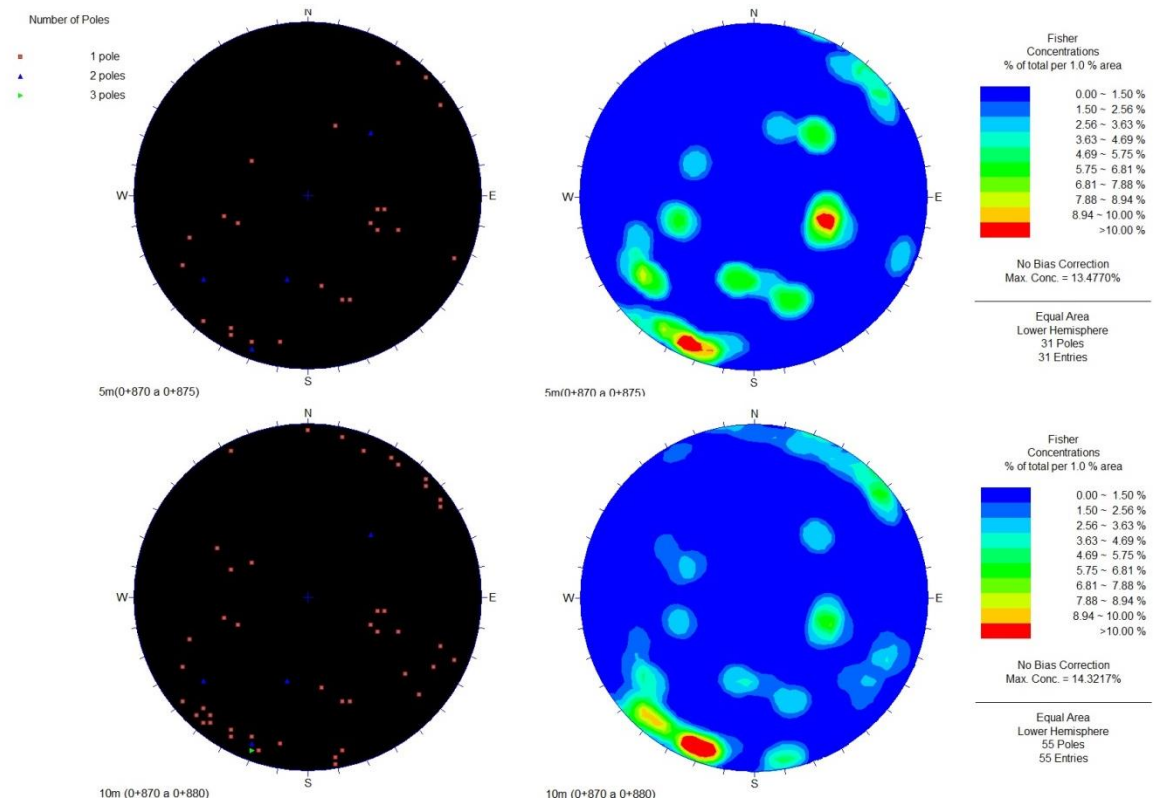


Fig. C1 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+871.70 a 0+875.60 pertencente ao túnel de adução 1, frente B

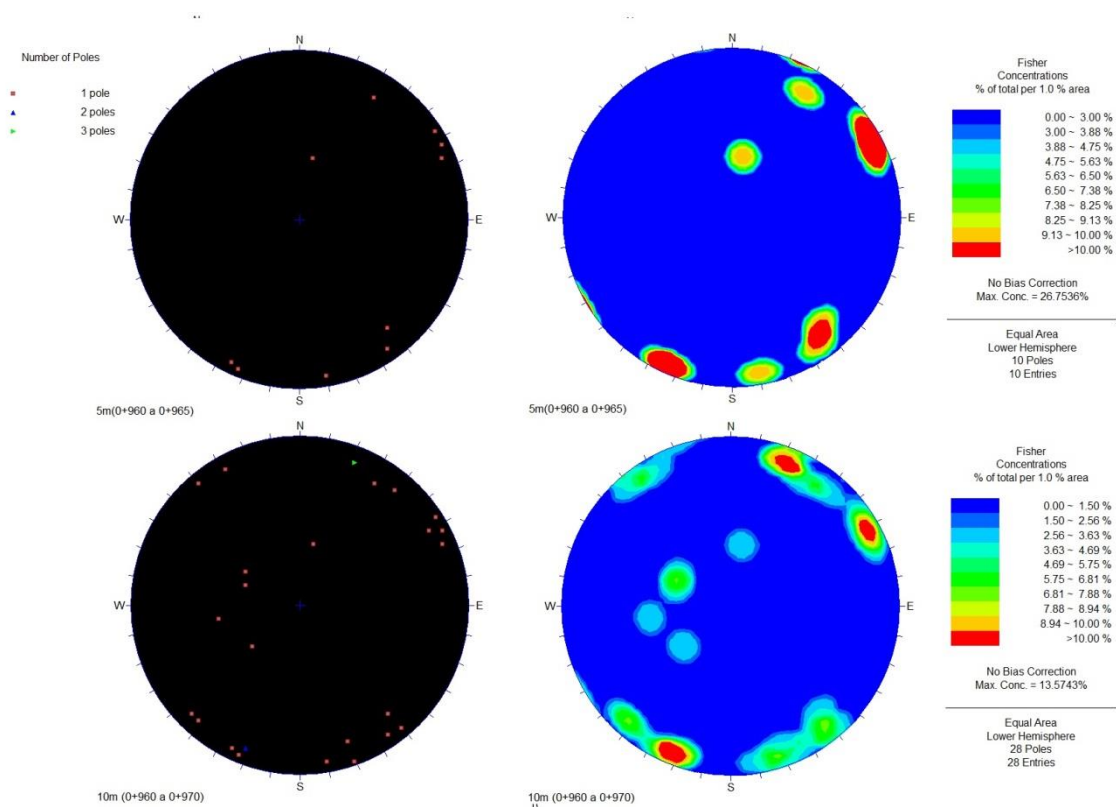


Fig. C2 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+961.90 a 0+966.10 pertencente ao túnel de adução 1, frente B

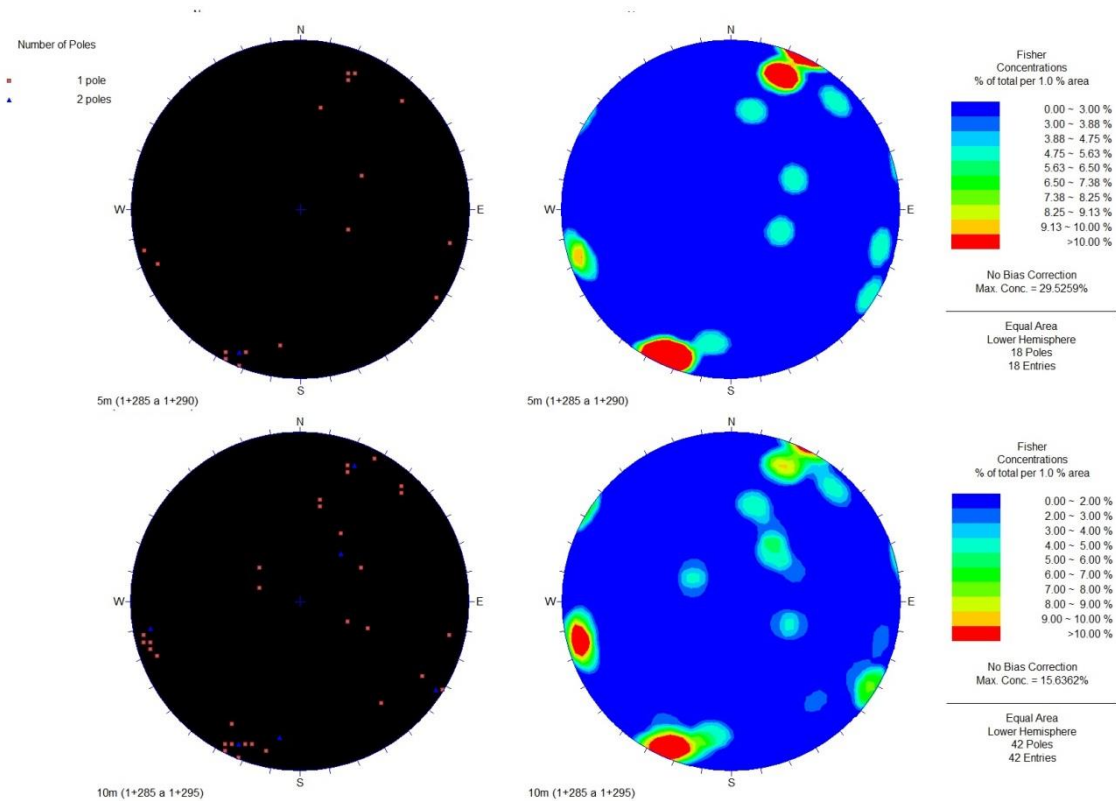


Fig. C3 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+285.50 a 1+288.30 pertencente ao túnel de adução 1, frente B

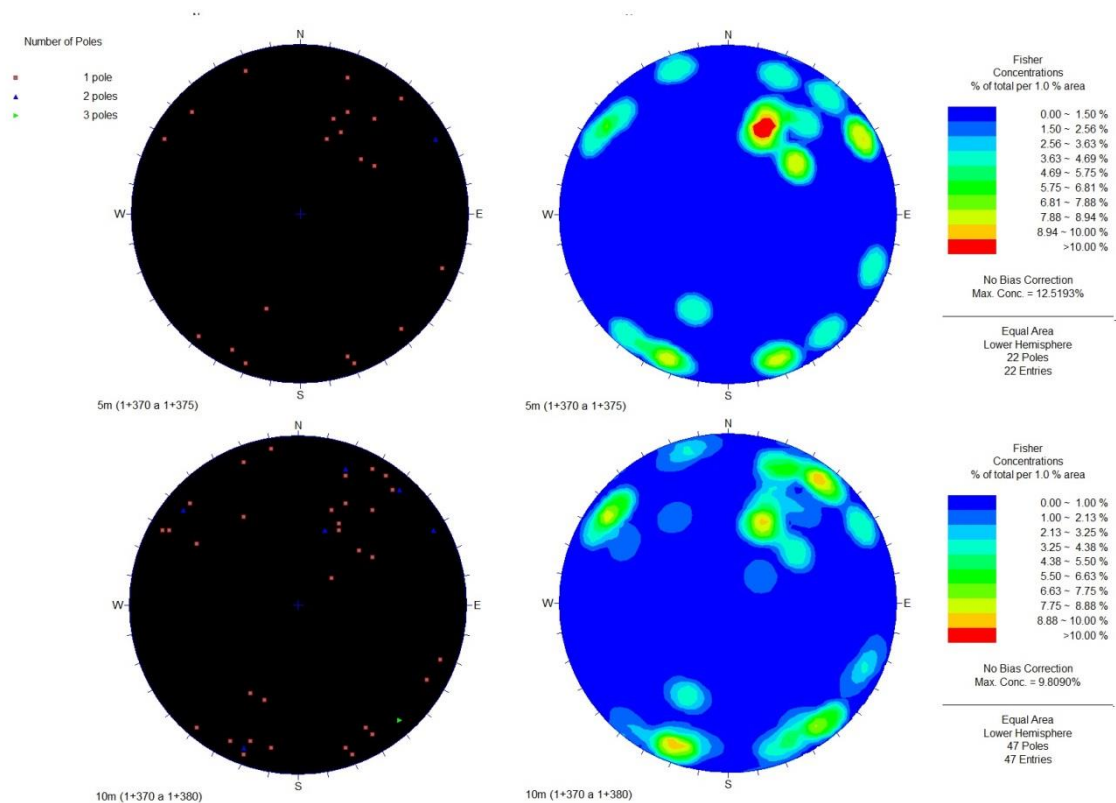


Fig. C4 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+370.70 a 1+373.80 pertencente ao túnel de adução 1, frente B

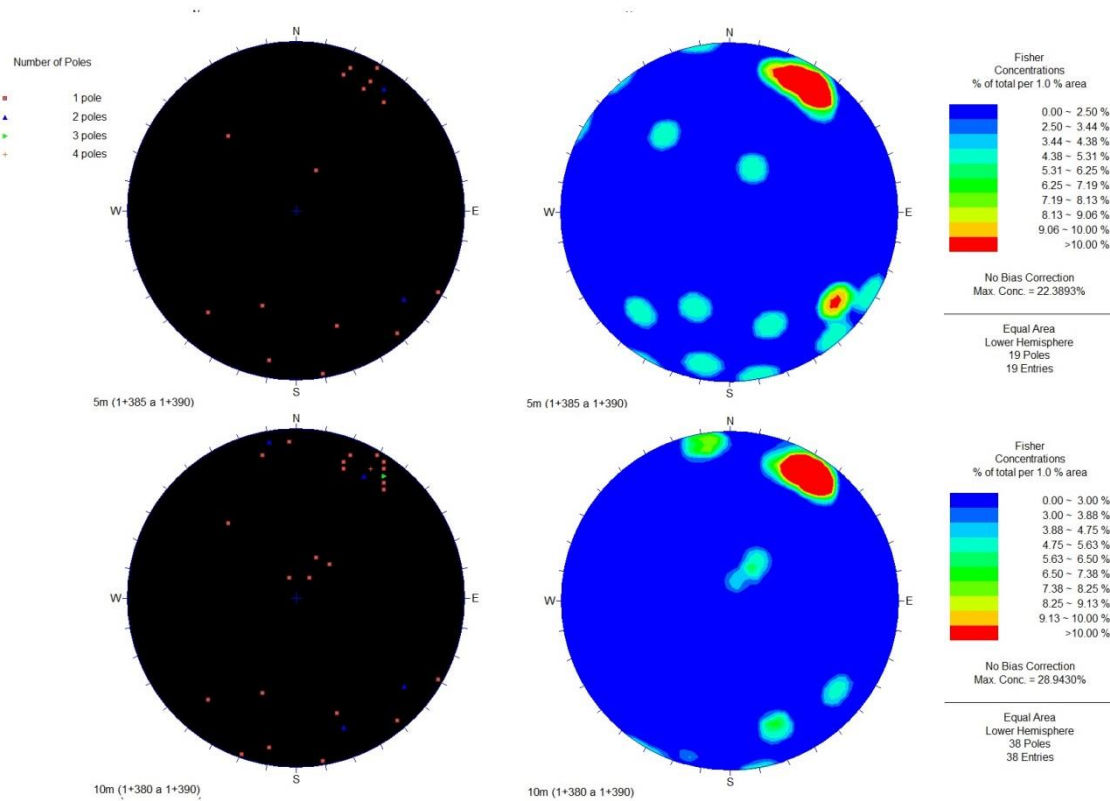


Fig. C5 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+384.80 a 1+388.50 pertencente ao túnel de adução 1, frente B

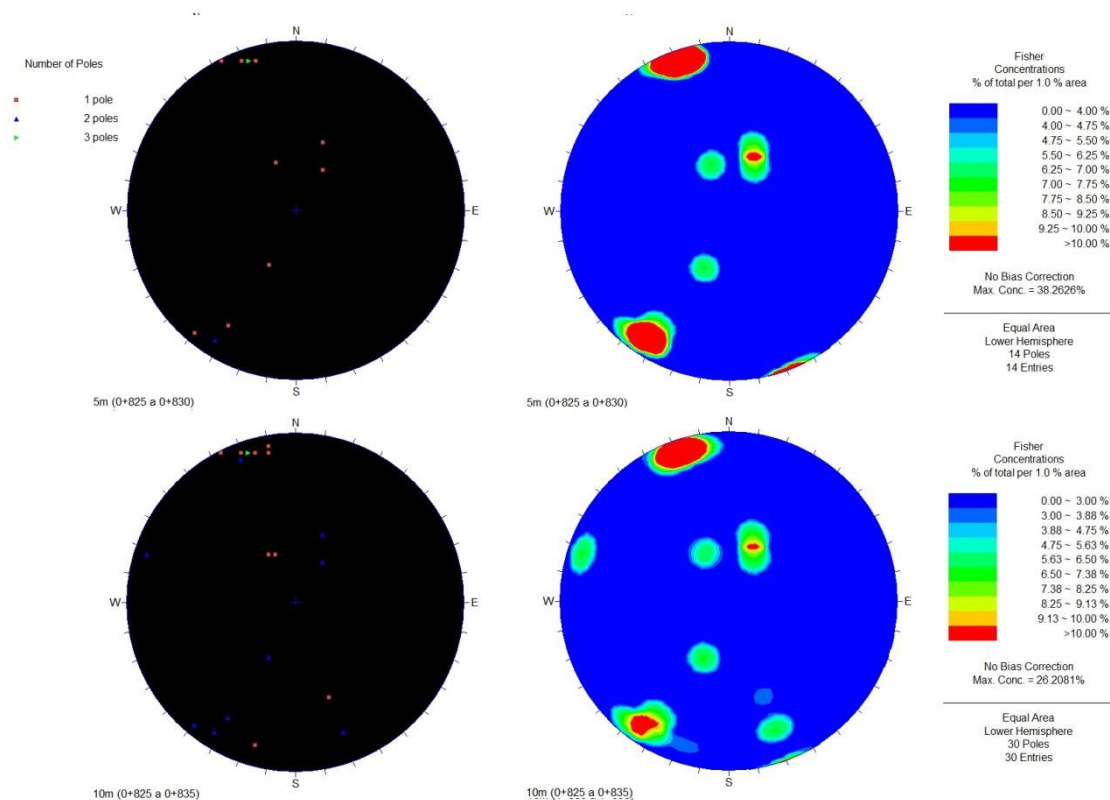


Fig. C6 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+825.00 a 0+831.00 pertencente ao túnel de adução 1, frente C

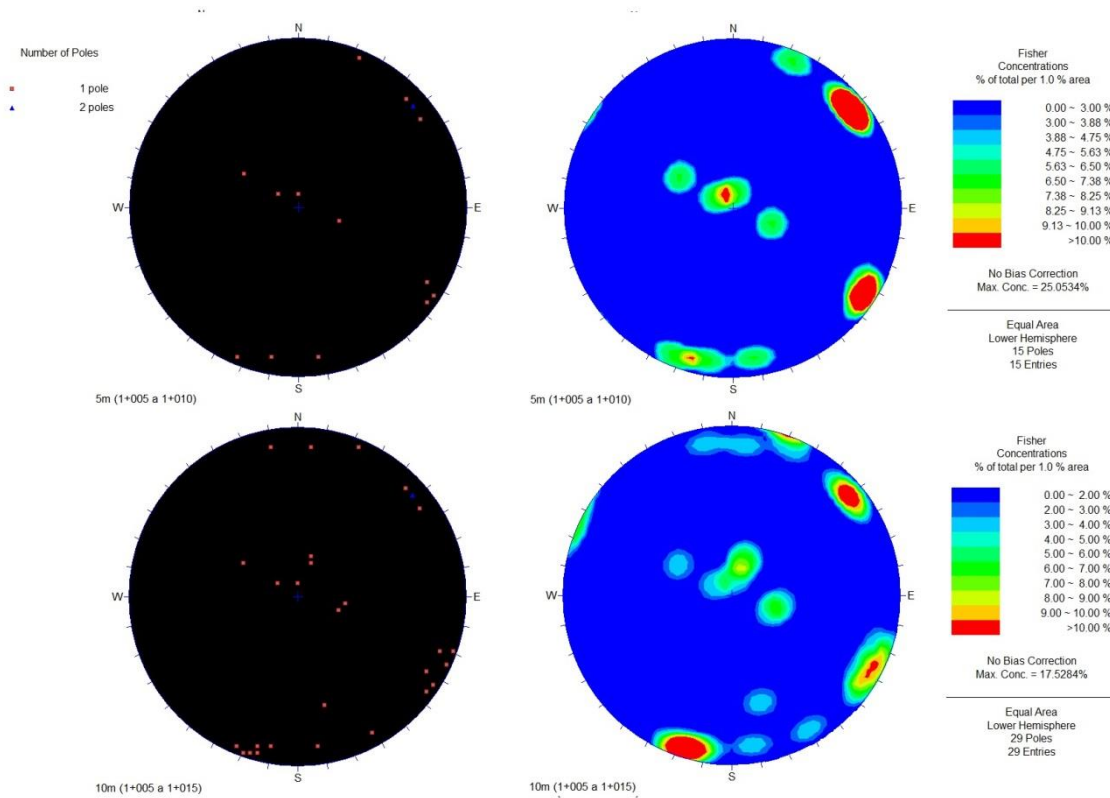


Fig. C7 - Projeção estereográfica das discontinuidades cartografadas no avanço 1+006.80 a 1+010.90 pertencente ao túnel de adução 2, frente B

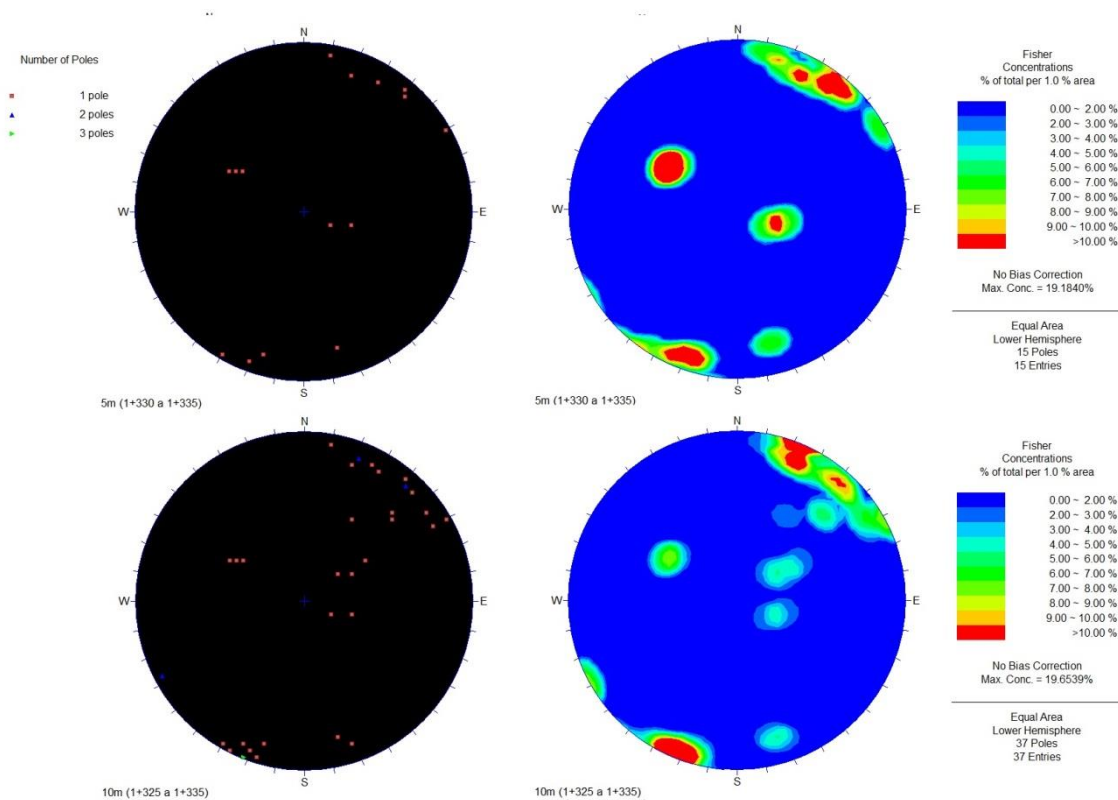


Fig. C8 - Projeção estereográfica das discontinuidades cartografadas no avanço 1+329.40 a 1+331.50 pertencente ao túnel de adução 2, frente B

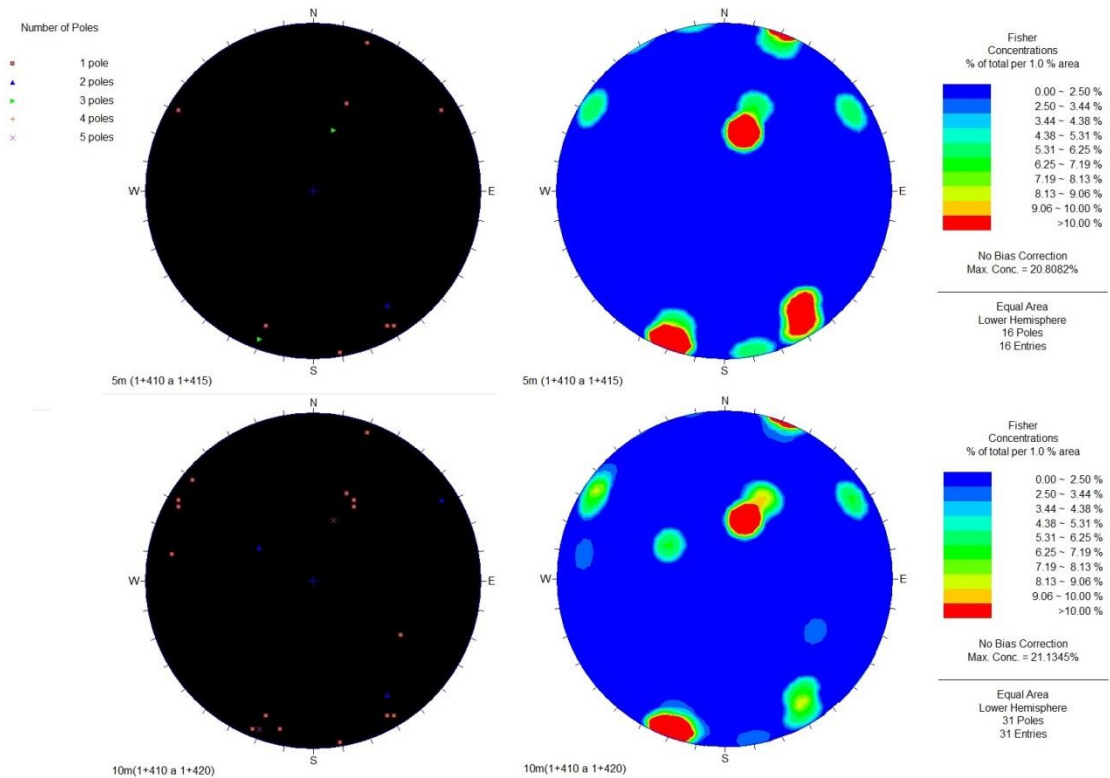


Fig. C9 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+412.70 a 1+416.60 pertencente ao túnel de adução 2, frente B

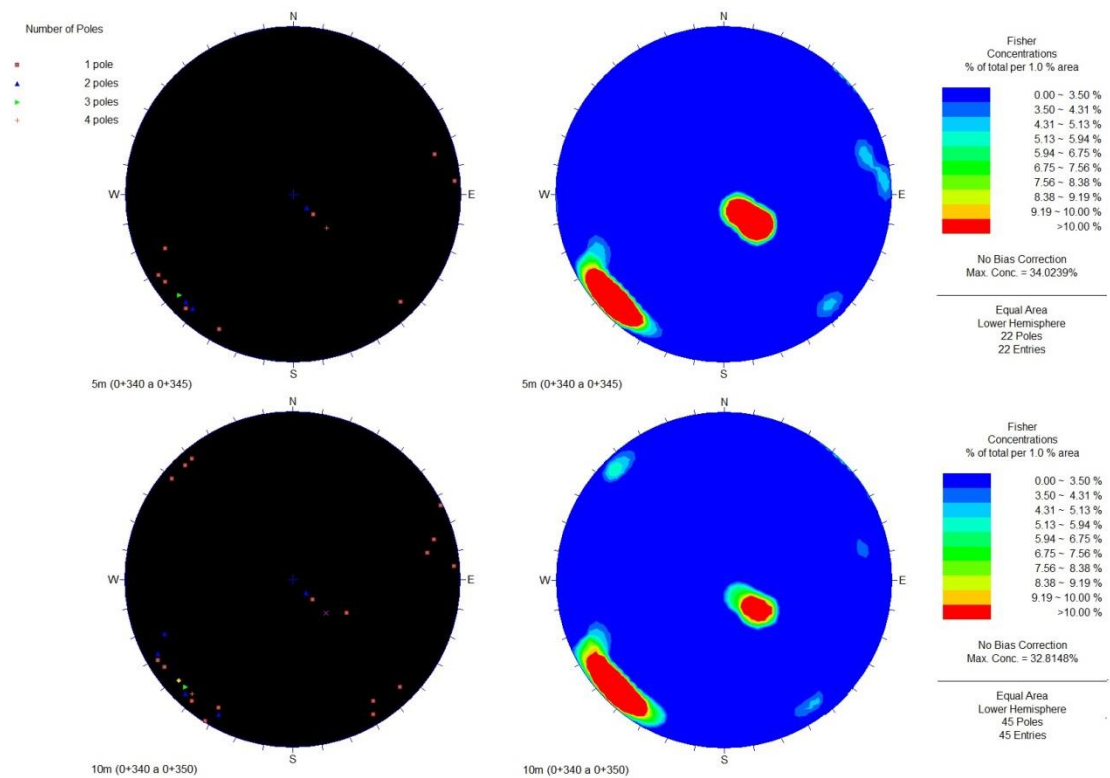


Fig. C10 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+342.00 a 0+348.00 (A) pertencente ao túnel de adução 2, frente C

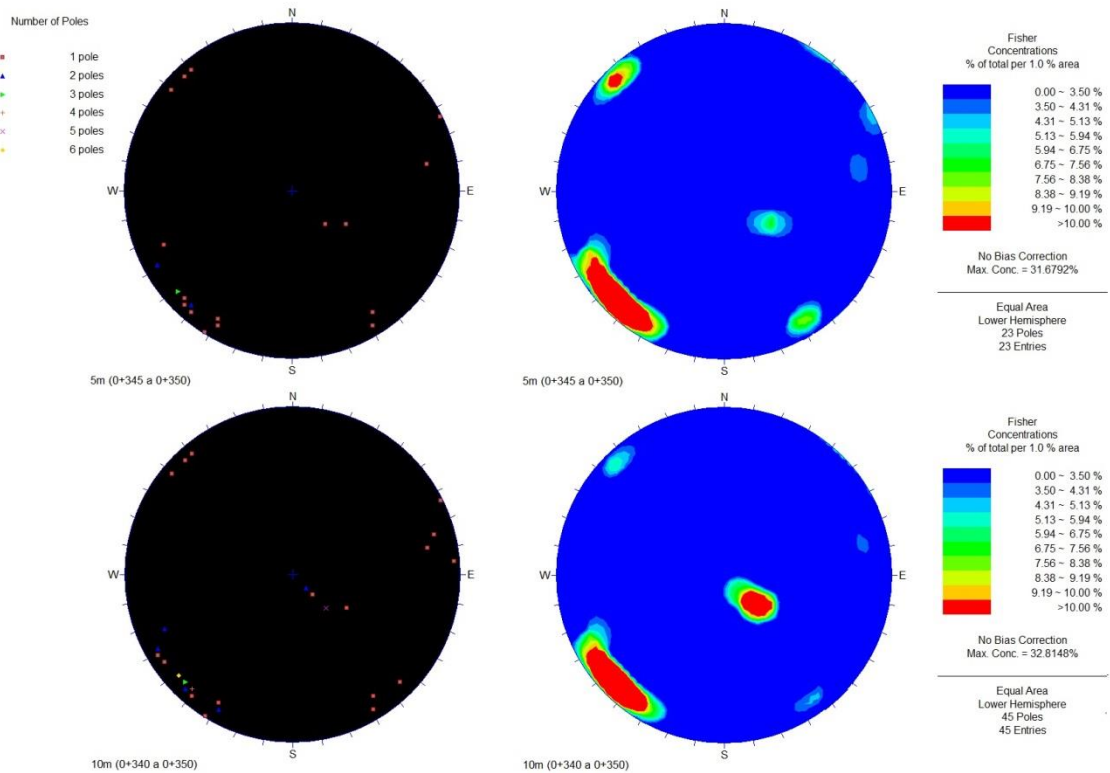


Fig. C11 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+342.00 a 0+348.00(B) pertencente ao túnel de adução 2, frente C

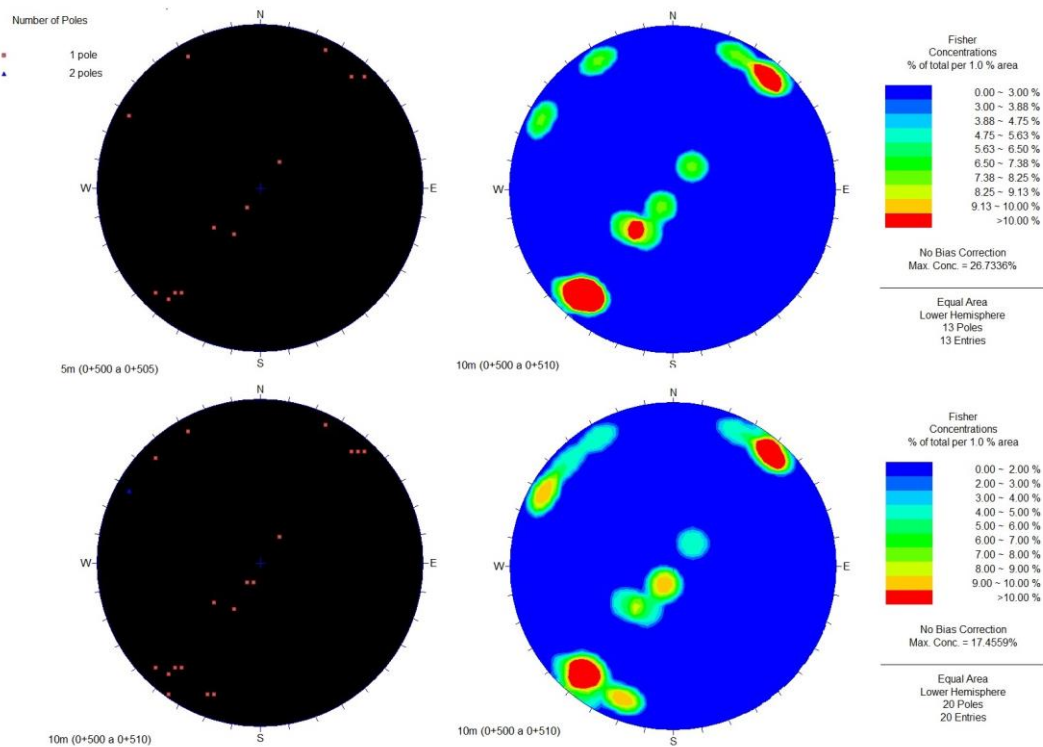


Fig. C12 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+501.50 a 0+506.00 pertencente ao túnel de adução 2, frente C

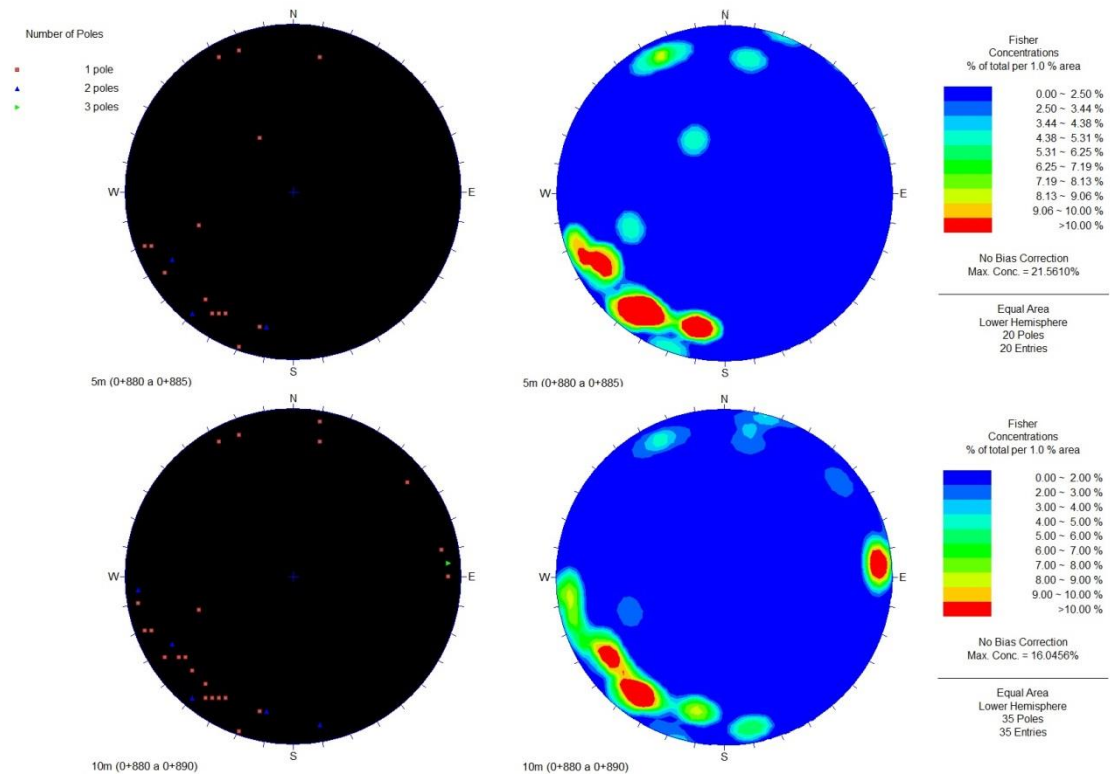


Fig. C13 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+881.50 a 0+885.50 pertencente ao túnel de adução 2, frente C

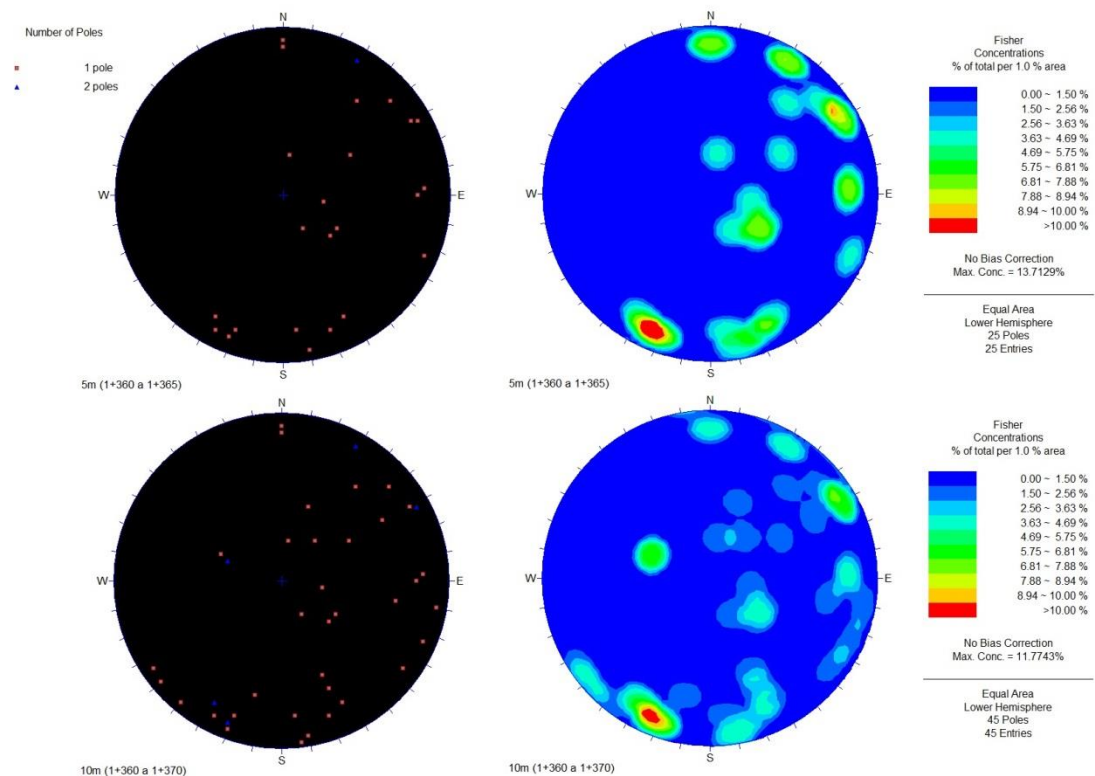


Fig. C14 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+361.70 a 1+365.90 pertencente ao túnel de adução 3, frente B

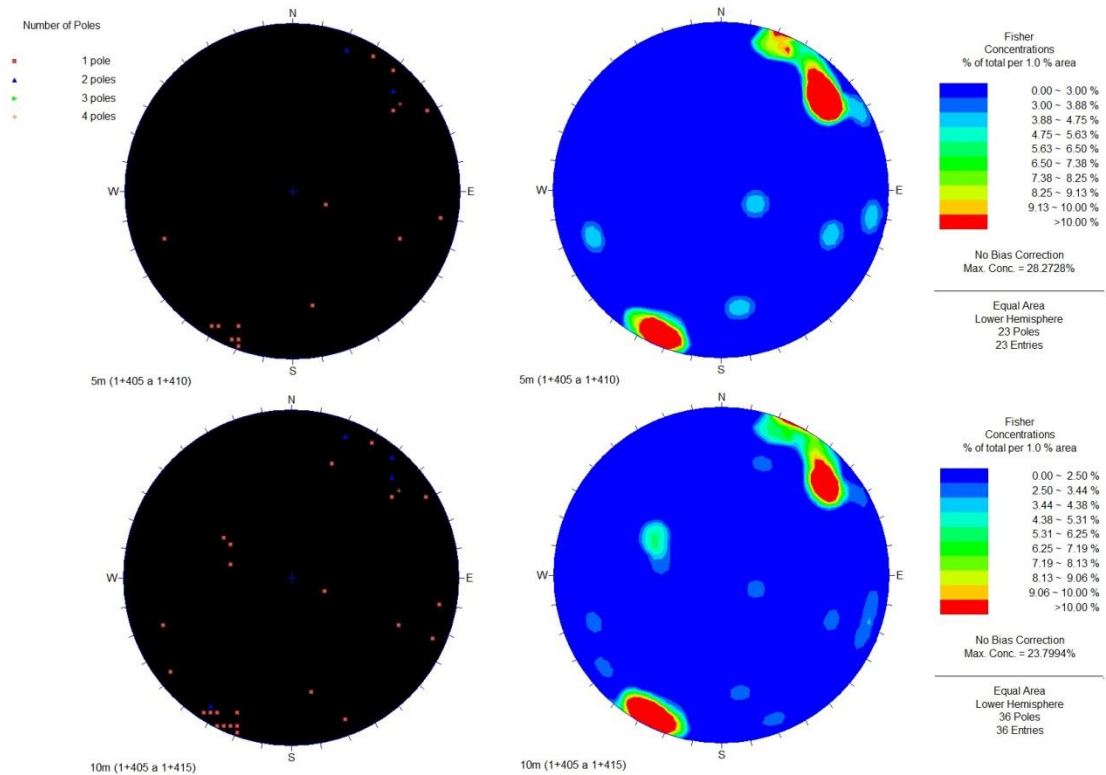


Fig. C15 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+406.10 a 1+410.50 pertencente ao túnel de adução 3, frente B

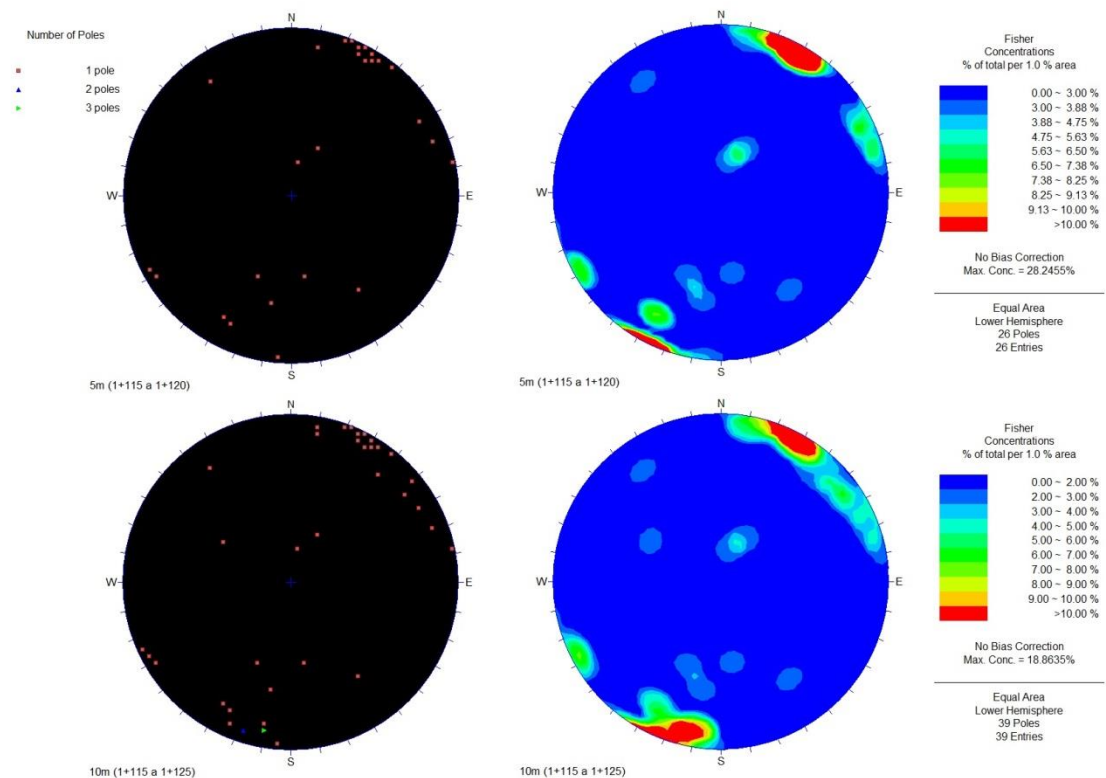


Fig. C16 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+117.80 a 1+121.10 pertencente ao túnel de adução 3, frente B

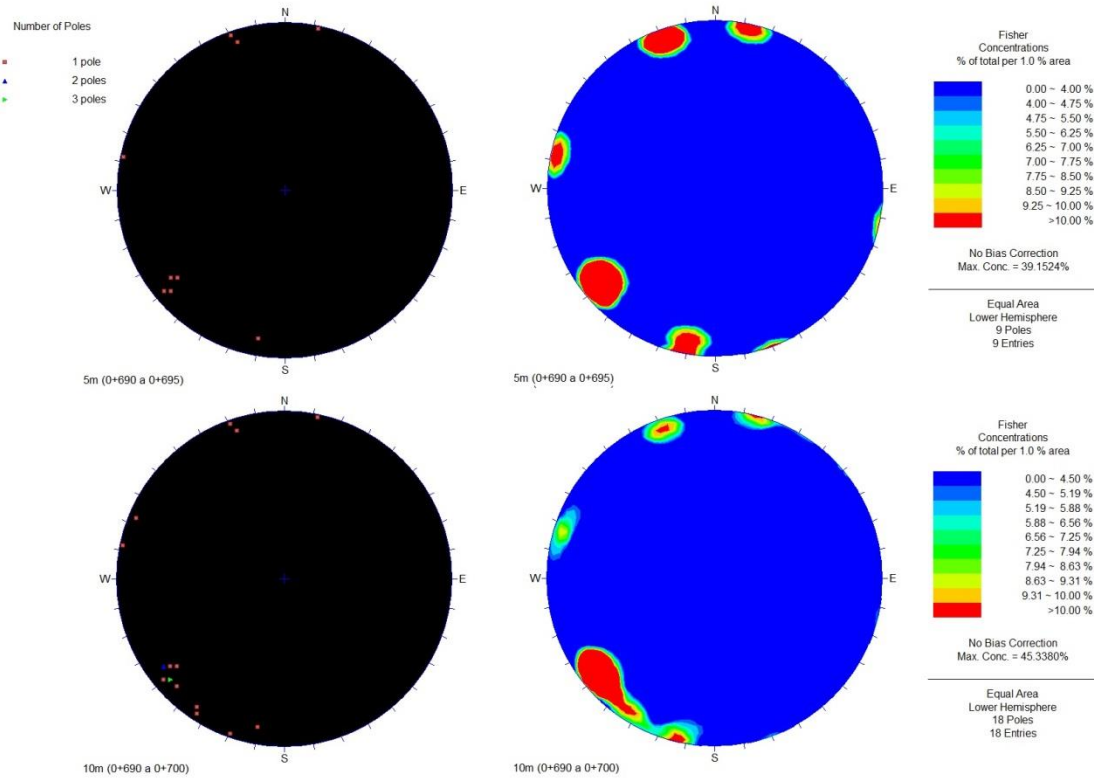


Fig. C17 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+692.00 a 0+698.00 (A) pertencente ao túnel de adução 3, frente C

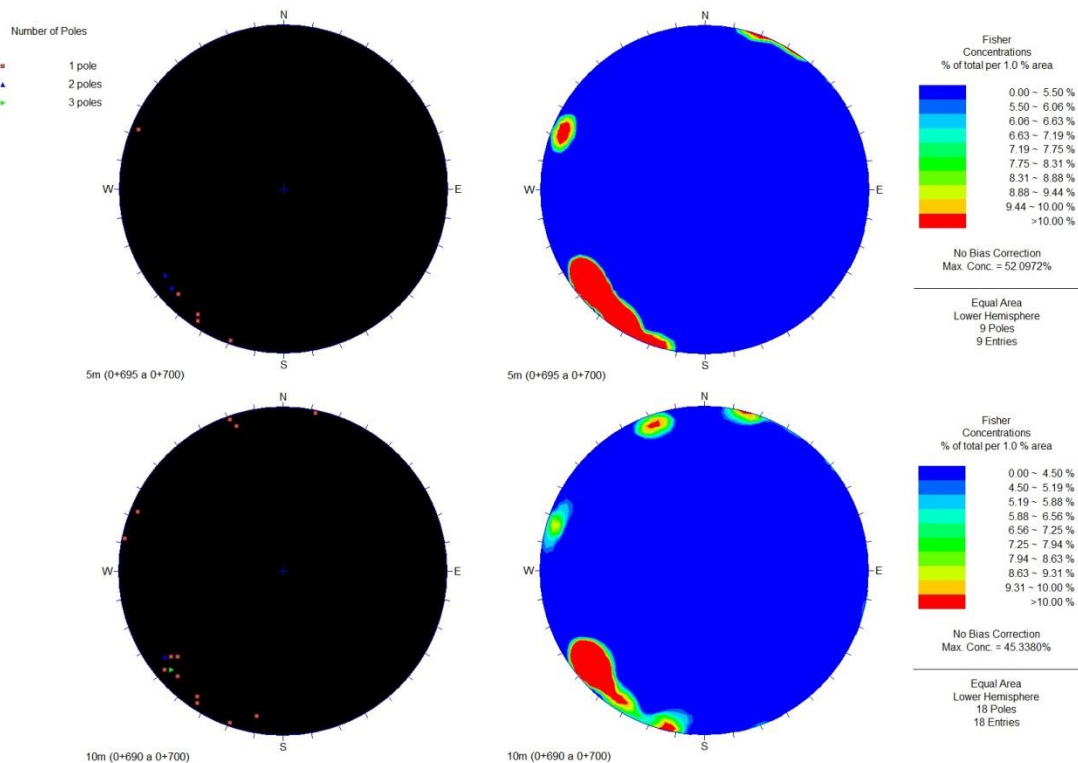


Fig. C18 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+692.00 a 0+698.00 (B) pertencente ao túnel de adução 3, frente C

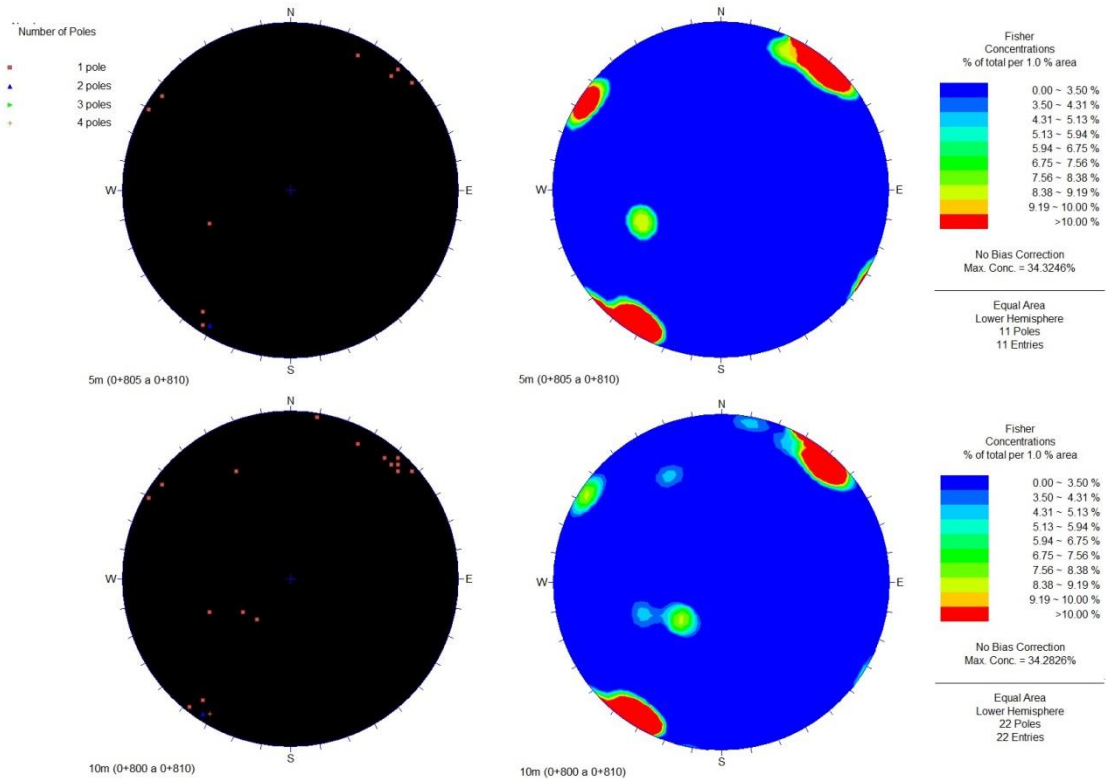


Fig. C19 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+804.00 a 0+810.00 pertencente ao túnel de adução 3, frente C

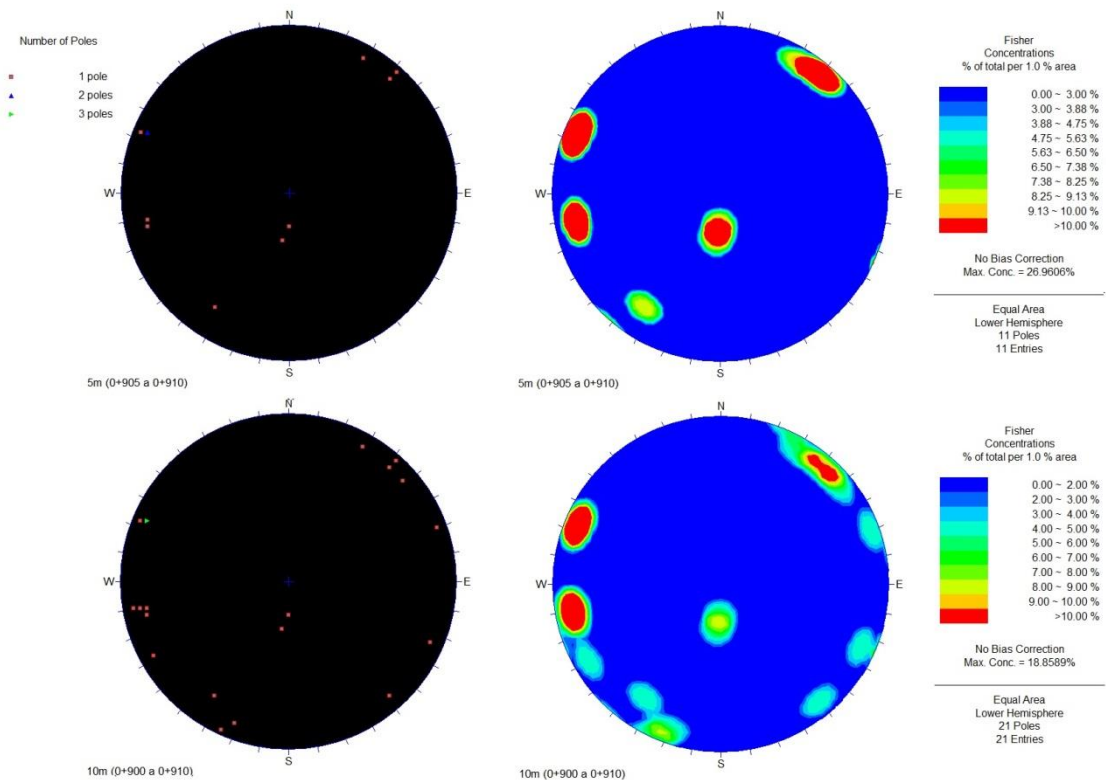


Fig. C20 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+904.50 a 0+910.50 pertencente ao túnel de adução 3, frente C

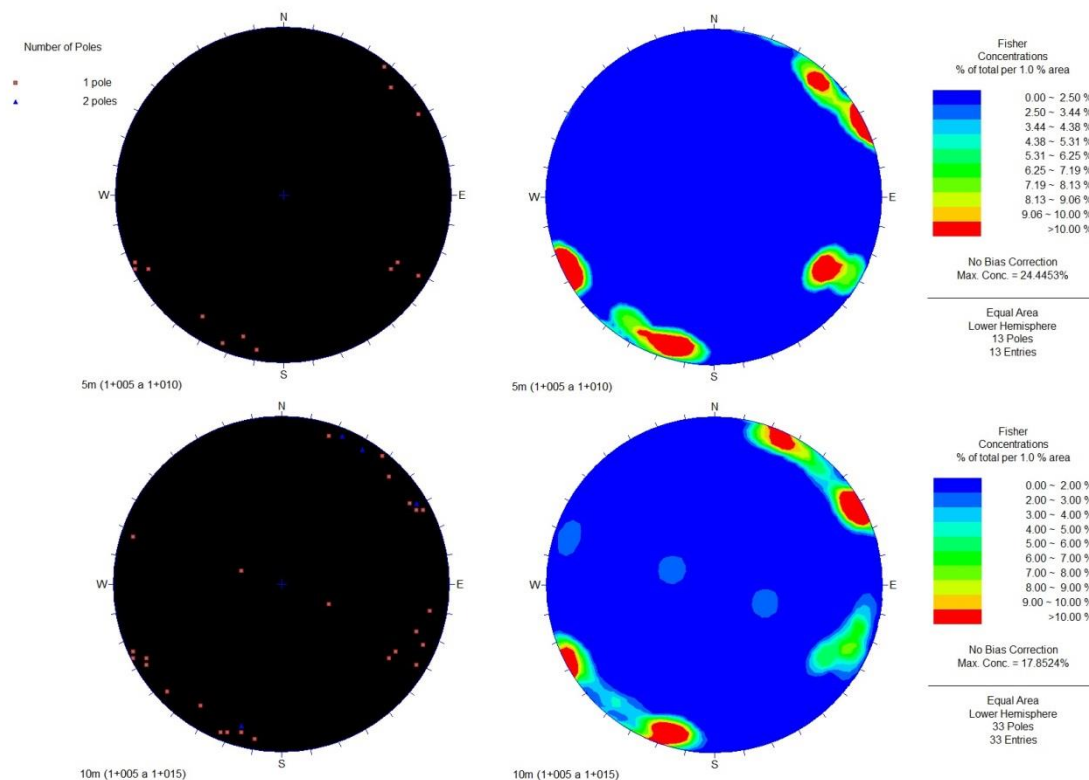


Fig. C21 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+005.60 a 1+008.90 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

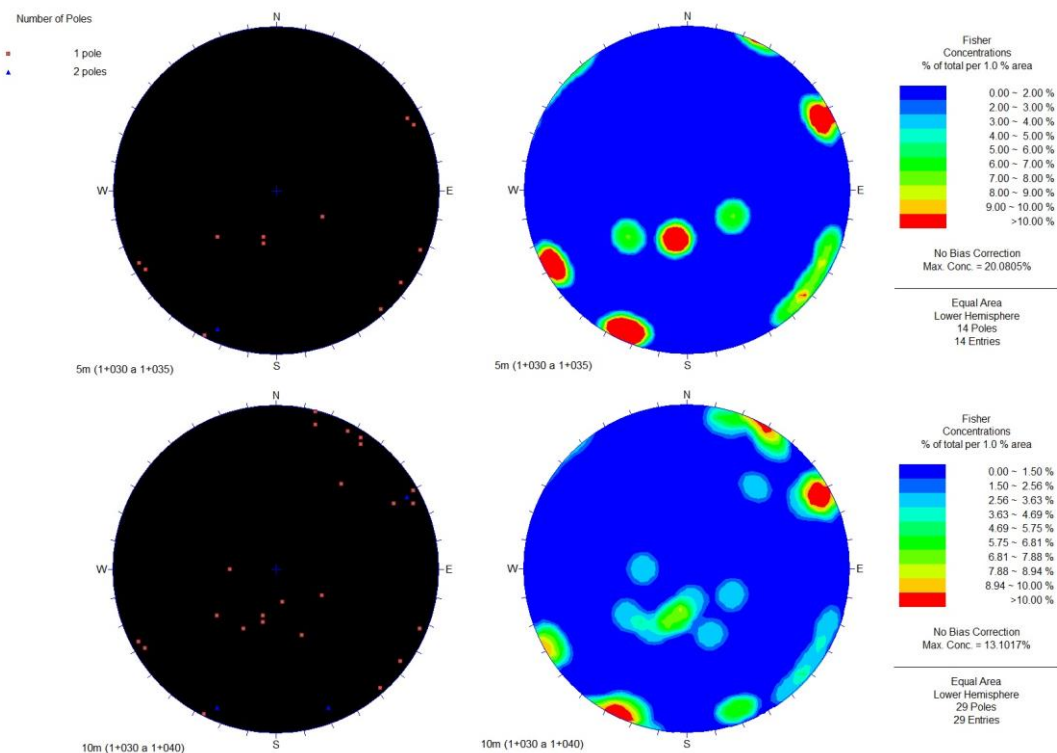


Fig. C22 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+030.70 a 1+034.80 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

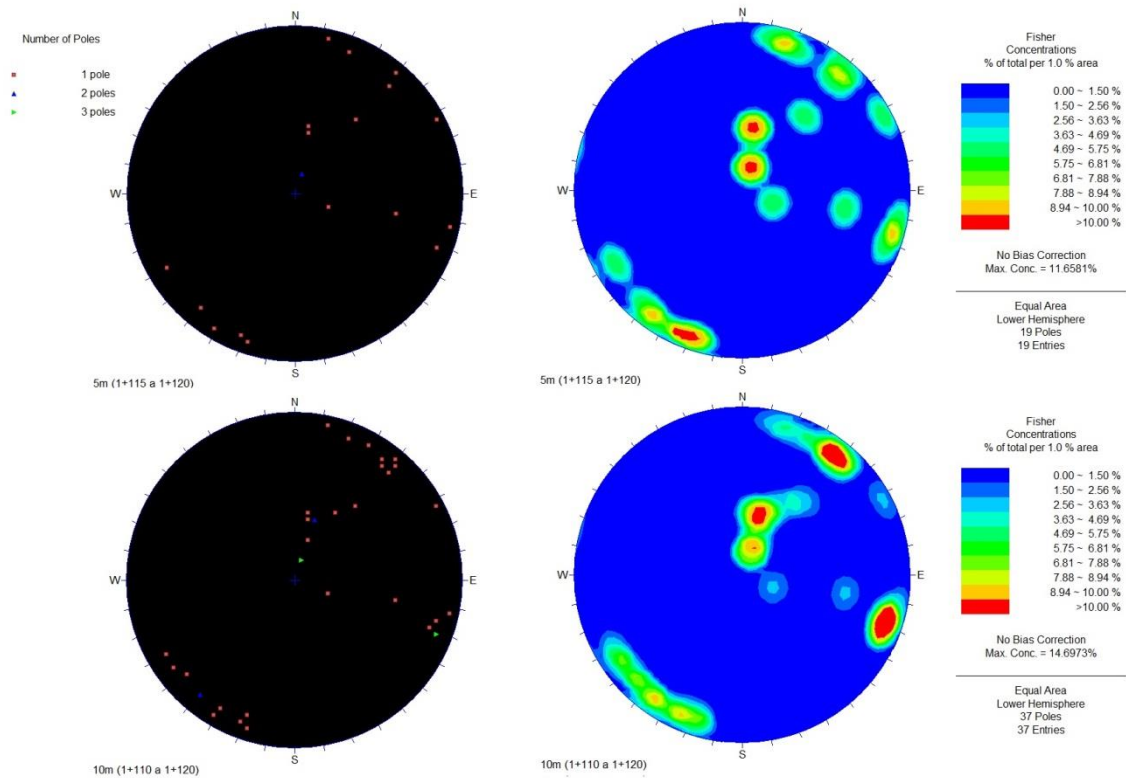


Fig. C23 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+113.30 a 1+117.40 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

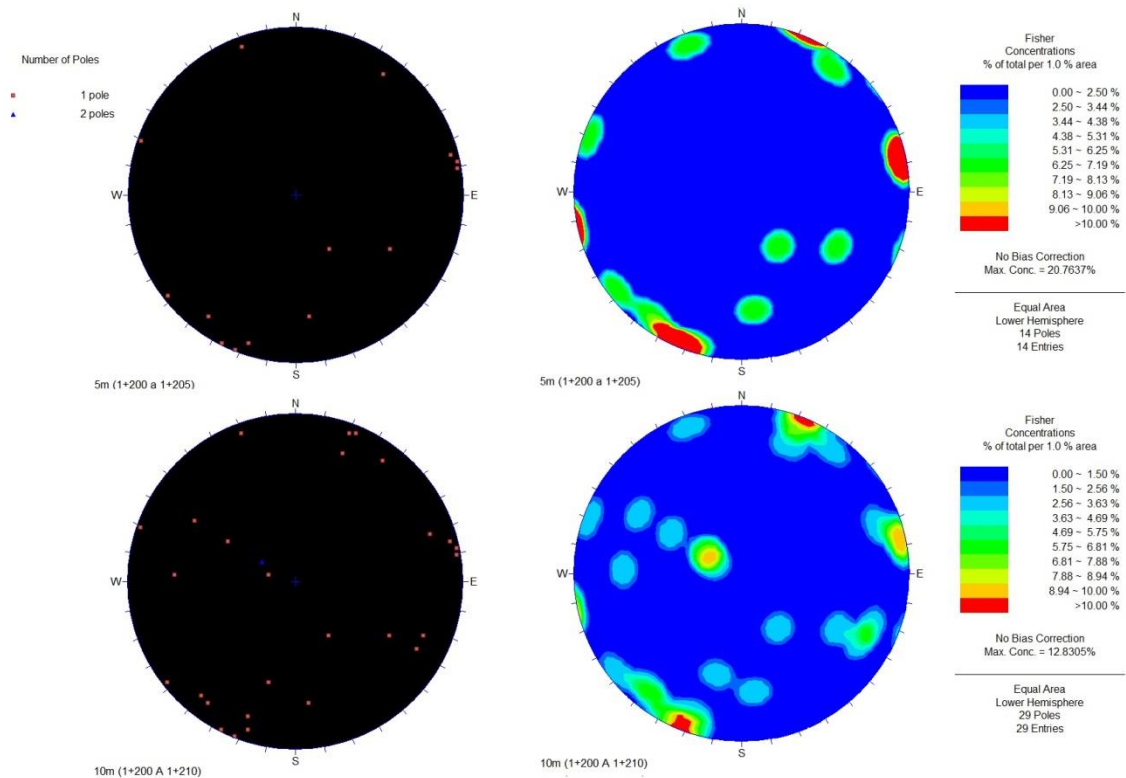


Fig. C24 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+201.30 a 1+205.40 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

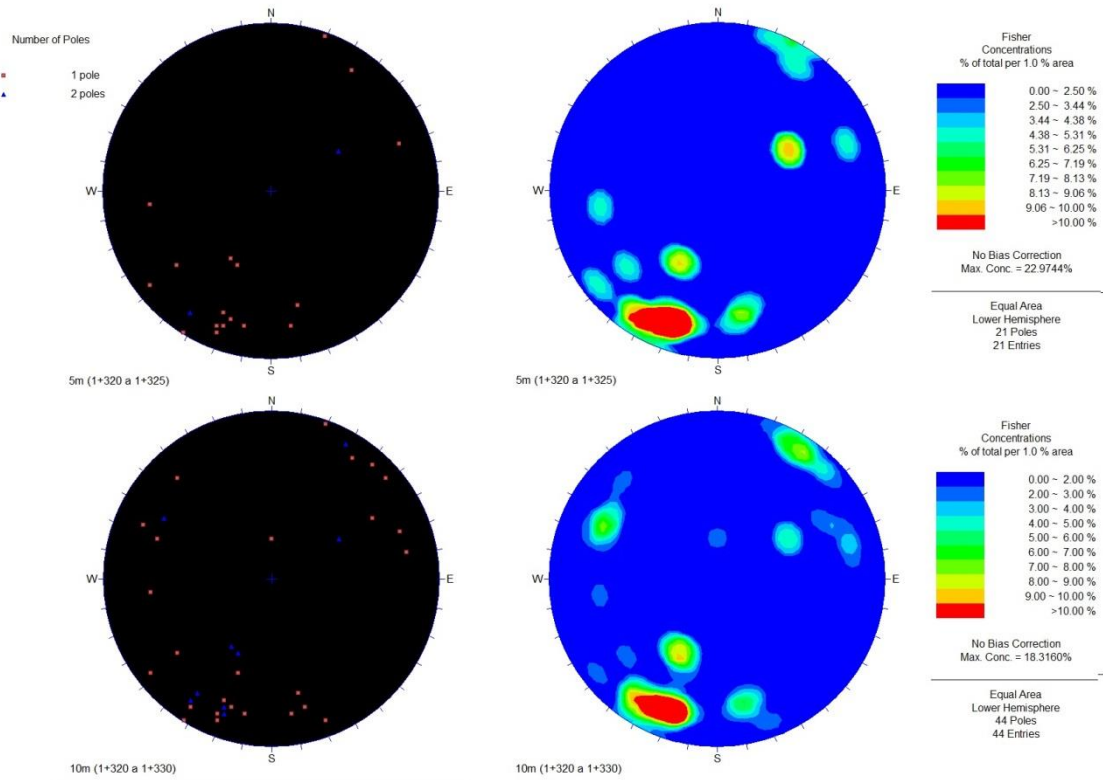


Fig. C25 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+320.20 a 1+323.40 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

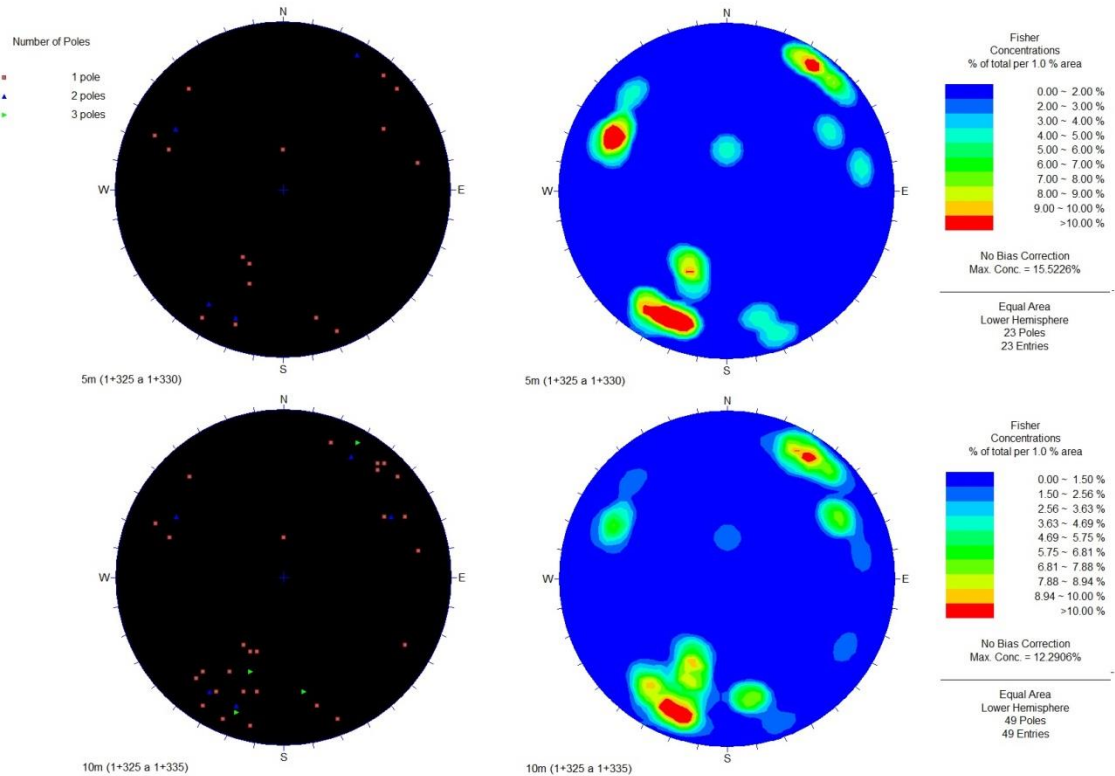


Fig. C26 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+327.20 a 1+330.40 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

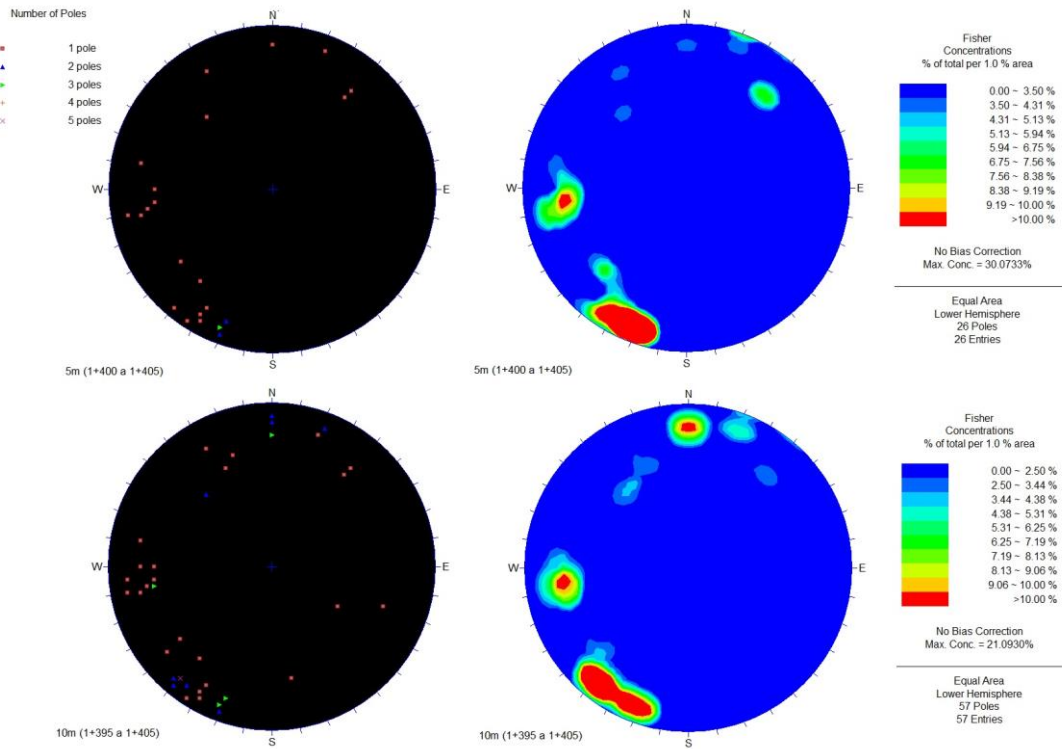


Fig. C27 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+399.20 a 1+403.10 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

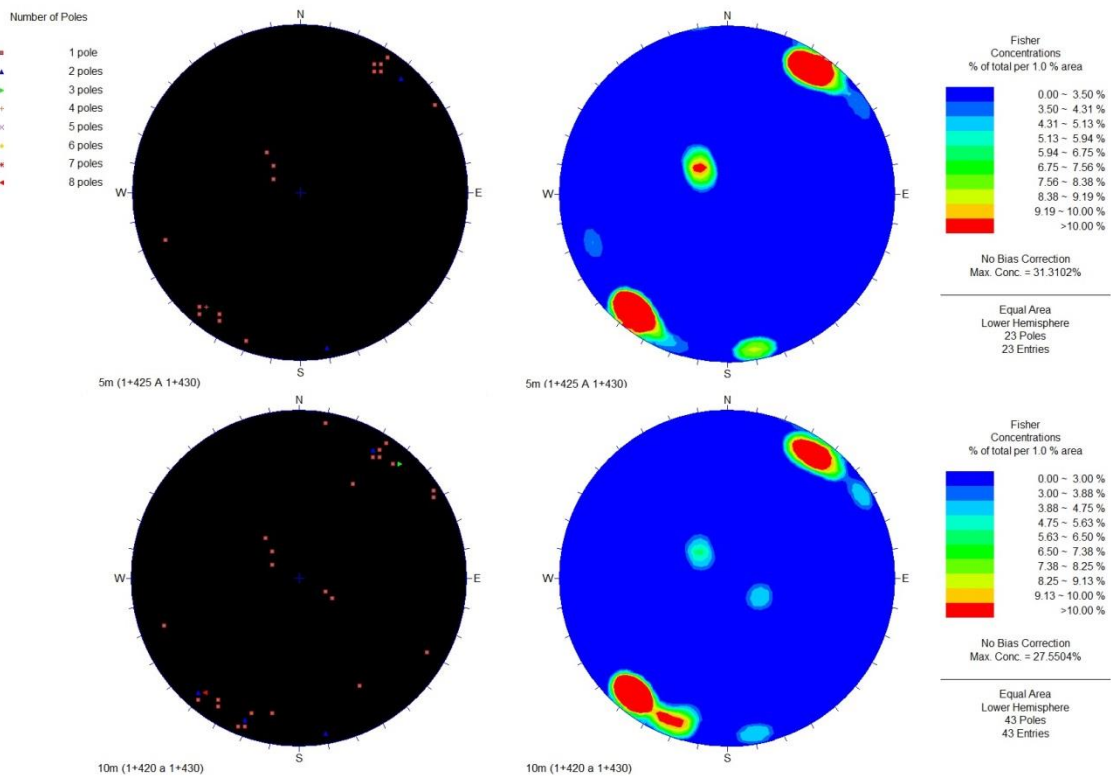


Fig. C28 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+423.40 a 1+427.30 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

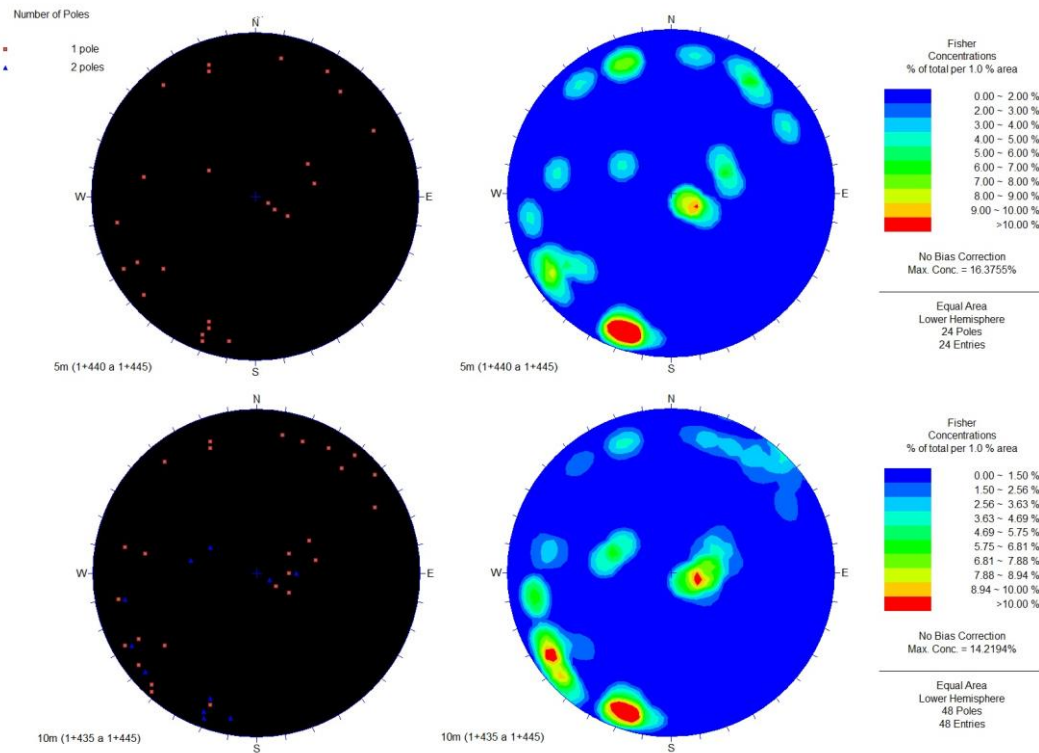


Fig. C29 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+439.80 a 1+444.50 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

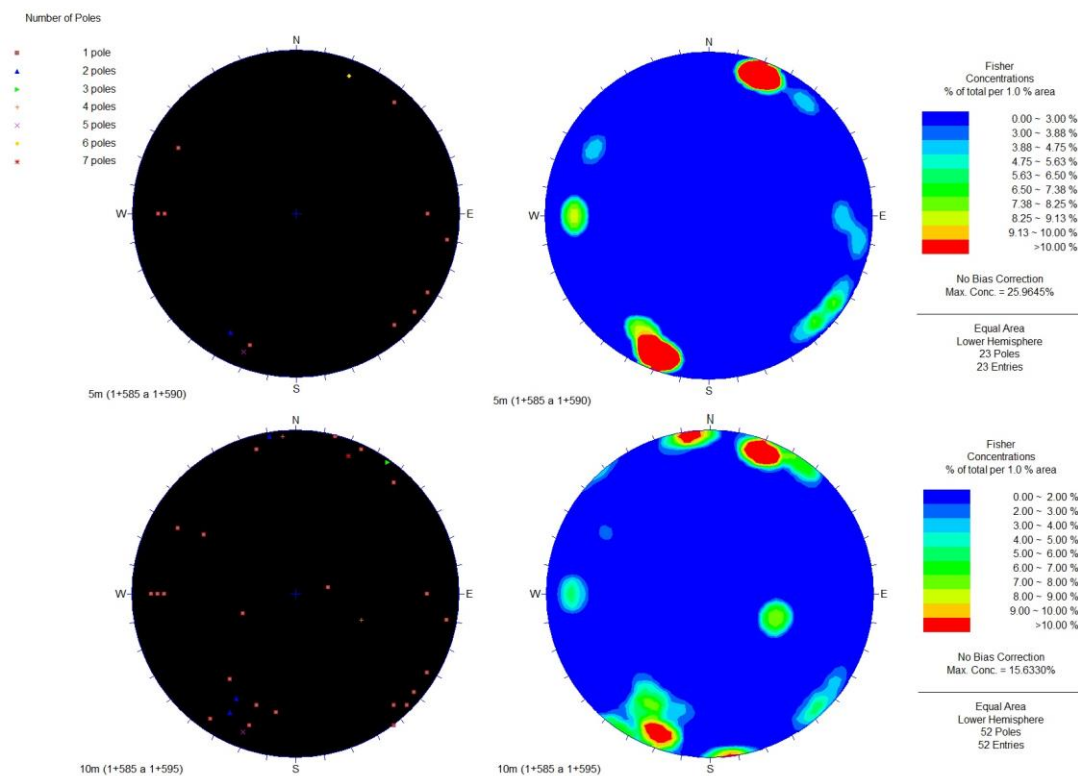


Fig. C30 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+587.40 a 1+591.30 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

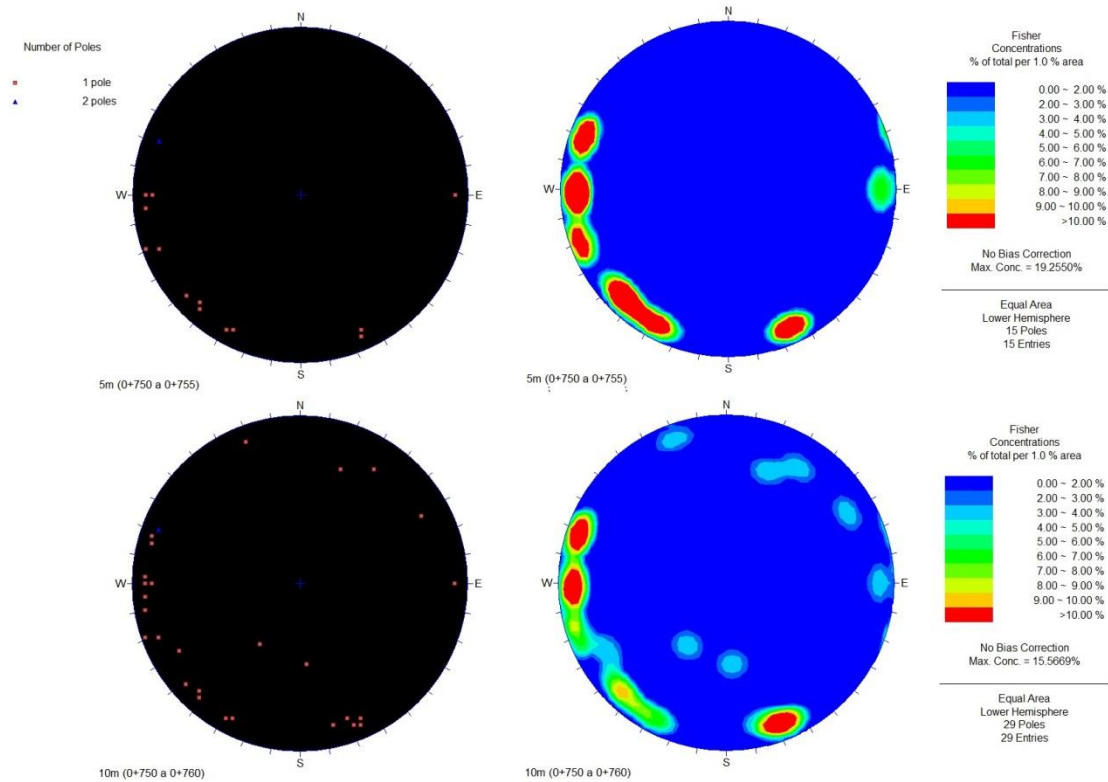


Fig. C31 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+751.50 a 0+757.00 pertencente ao túnel de adução 4, frente C

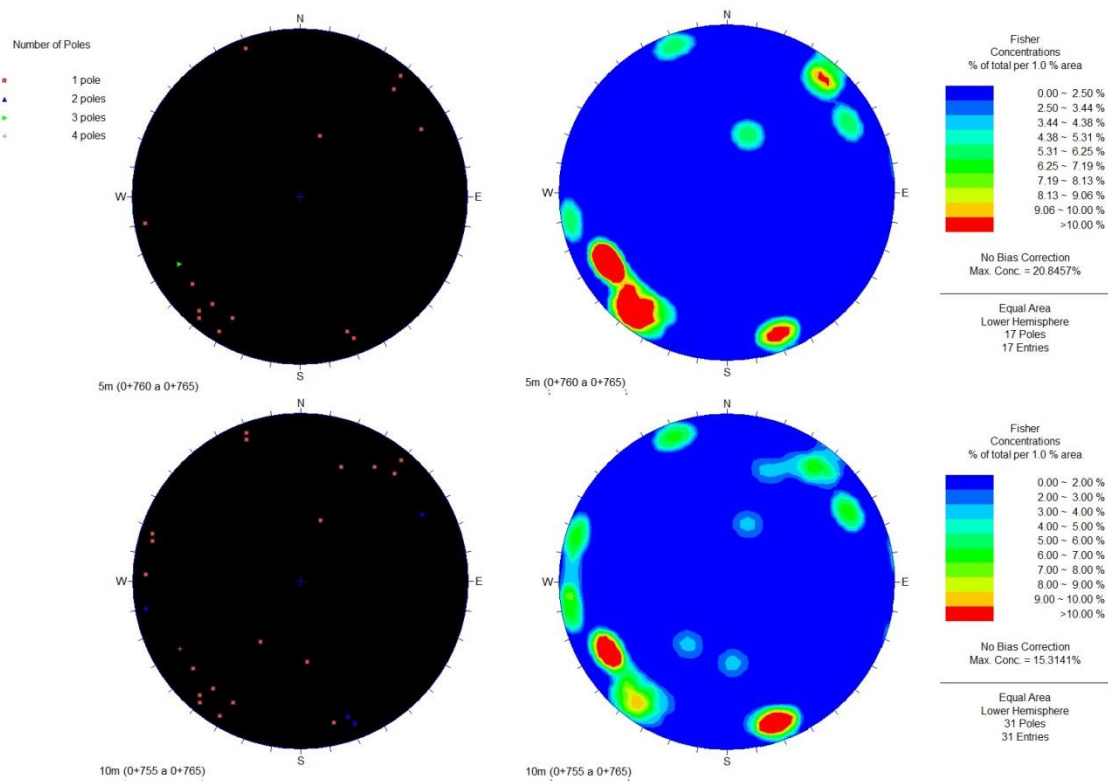


Fig. C32 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+757.00 a 0+763.50 pertencente ao túnel de adução 4, frente C

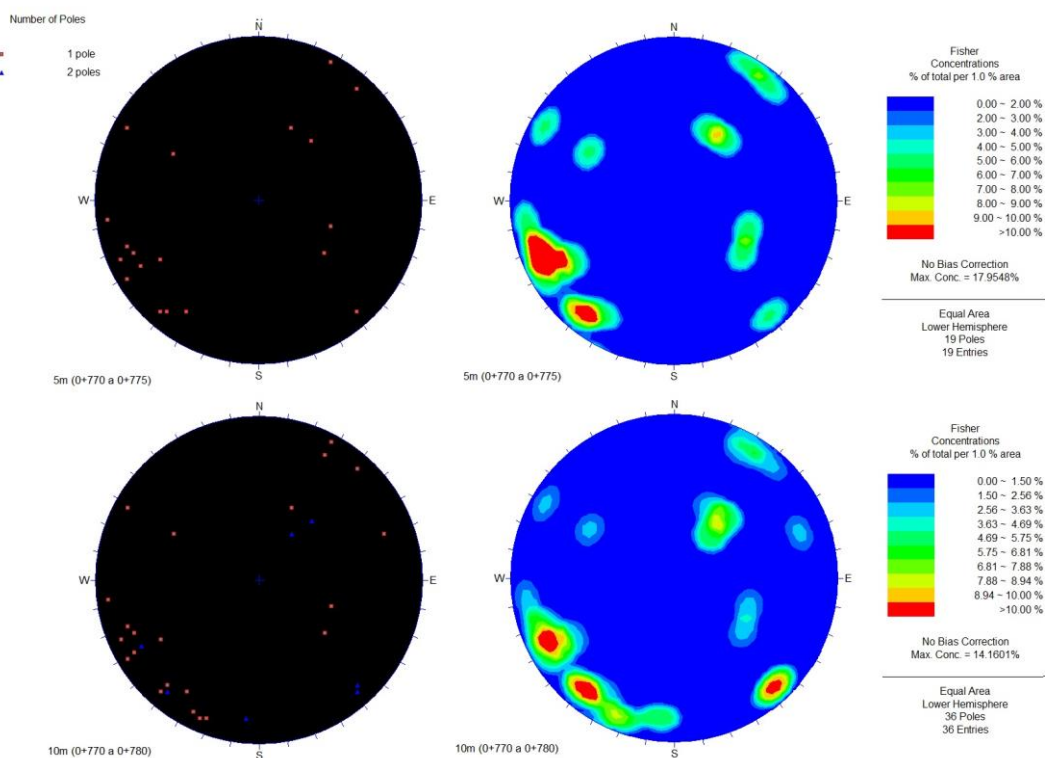


Fig. C33 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+770.50 a 0+776.00 pertencente ao túnel de adução 4, frente C

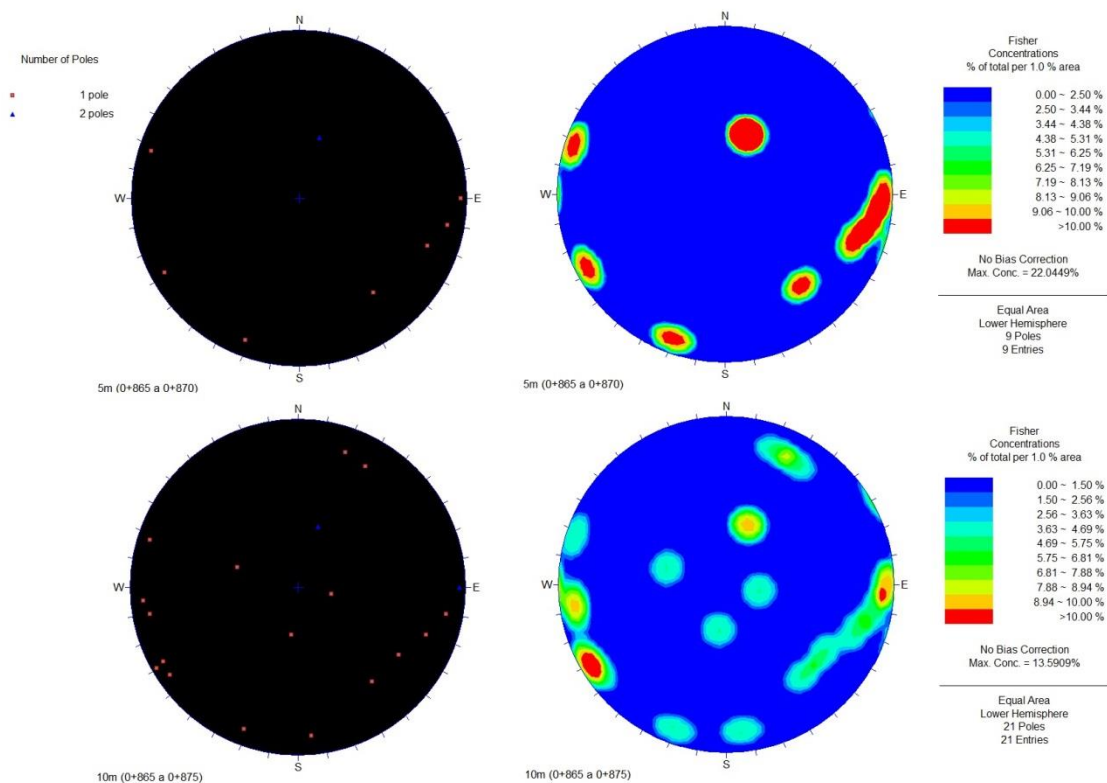


Fig. C34 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+867.00 a 0+872.50 pertencente ao túnel de adução 4, frente C

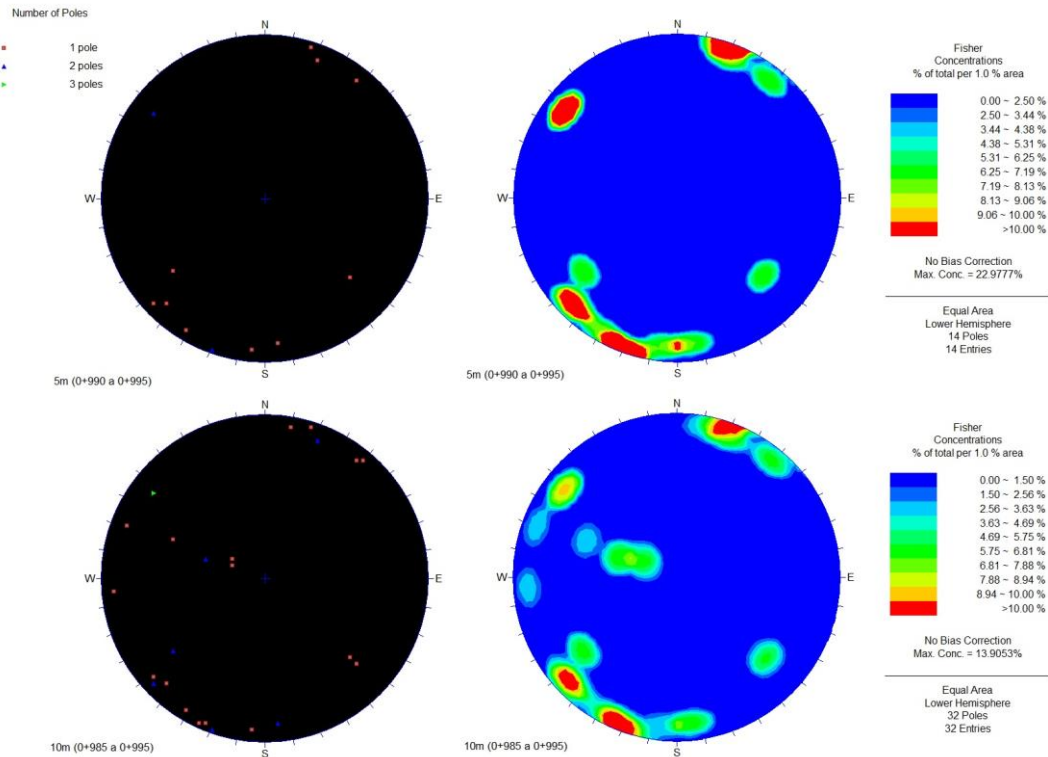


Fig. C35 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+988.00 a 0+994.00 pertencente ao túnel de adução 4, frente C

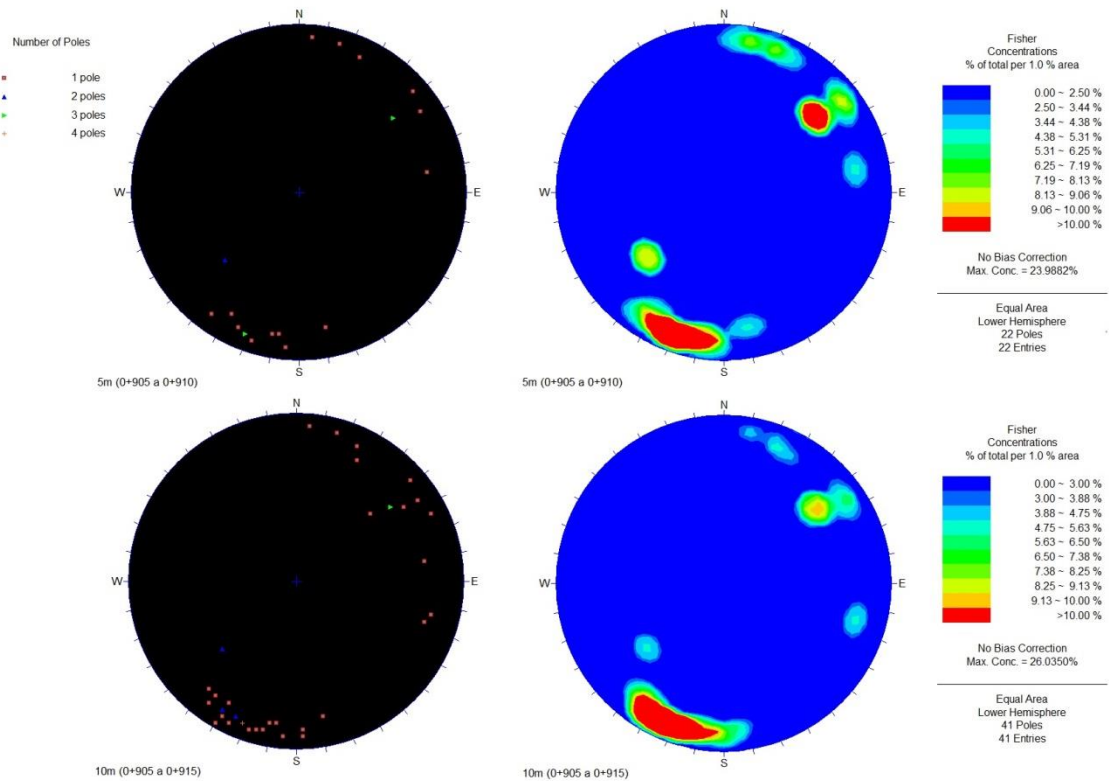


Fig. C36 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+907.60 a 0+912.00 pertencente ao túnel de adução 5, frente B

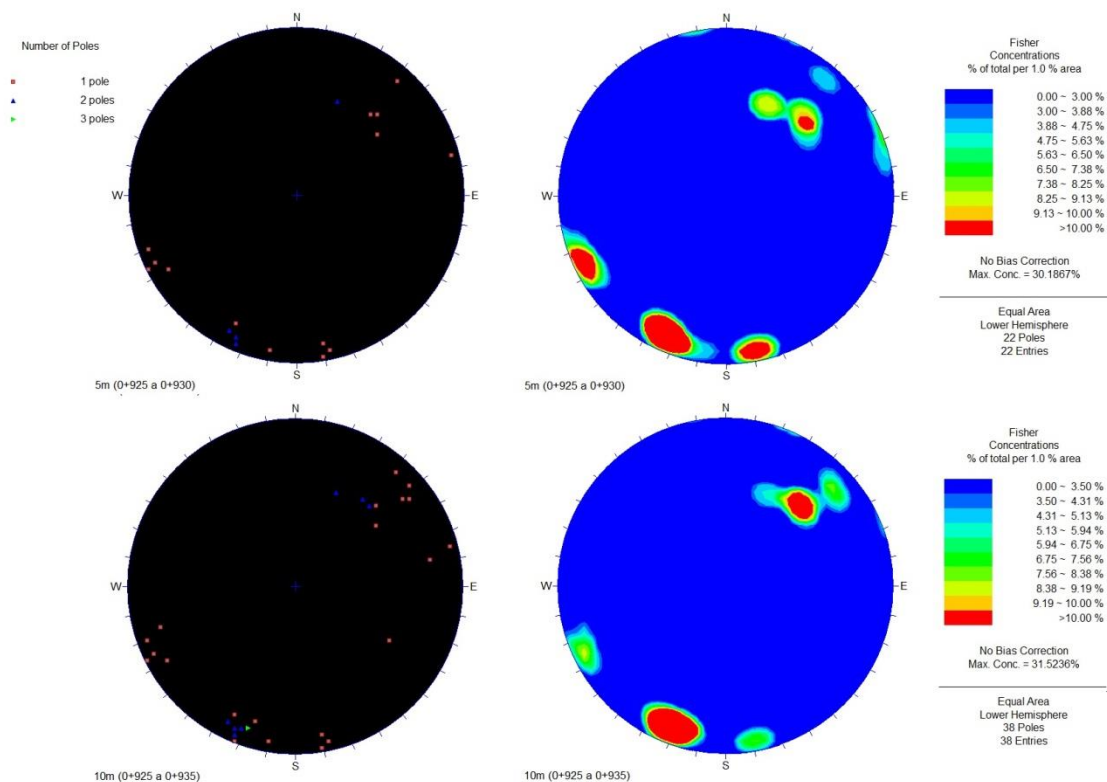


Fig. C37 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+927.70 a 0+930.90 pertencente ao túnel de adução 5, frente B

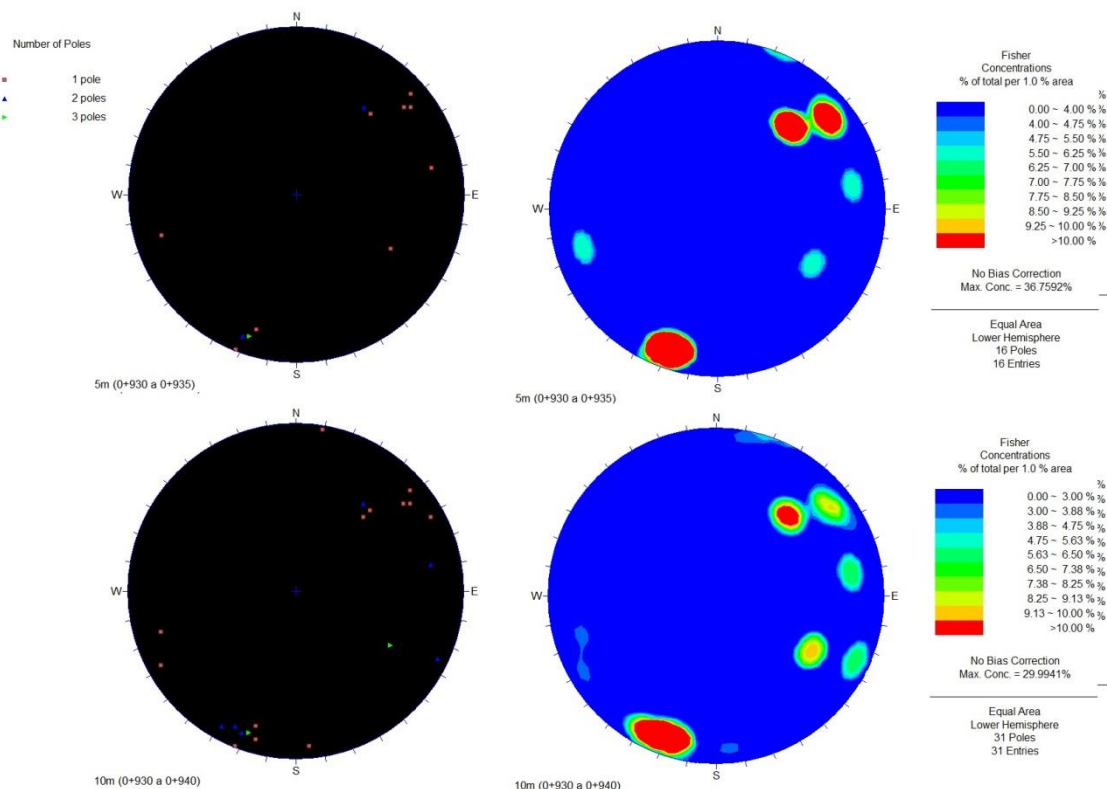


Fig. C38 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+930.90 a 0+934.70 pertencente ao túnel de adução 5, frente B

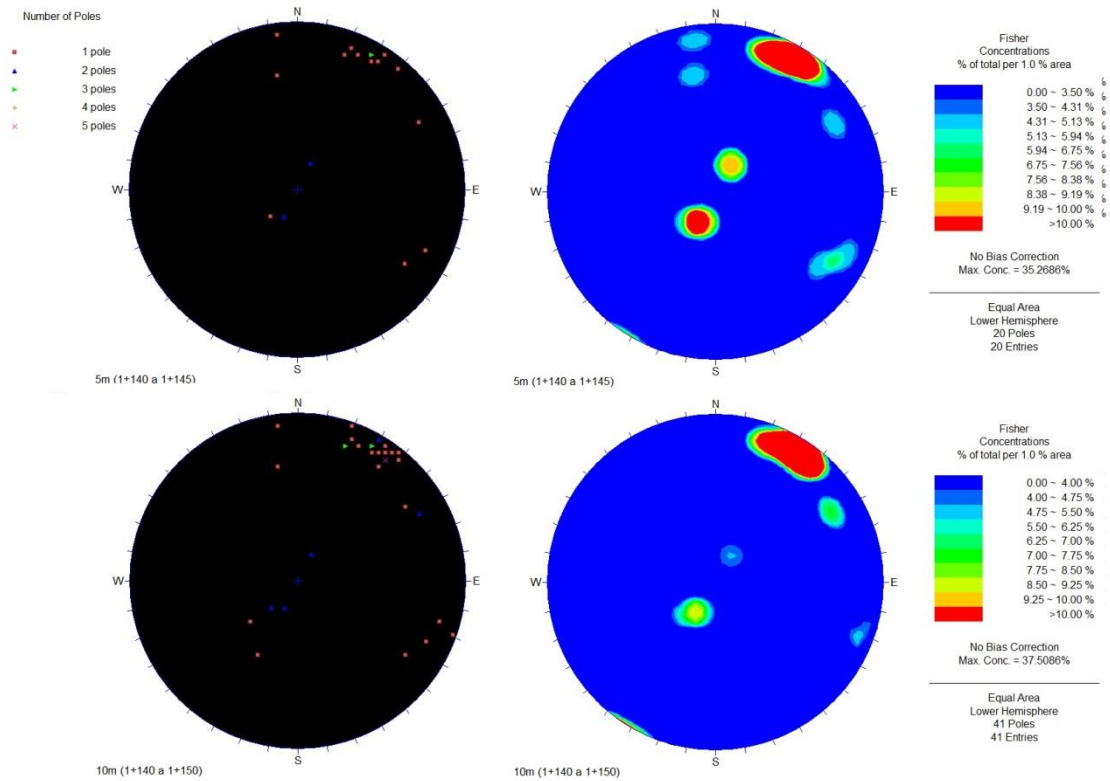


Fig. C39 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+142.80 a 1+147.10 pertencente ao túnel de adução 5, frente B

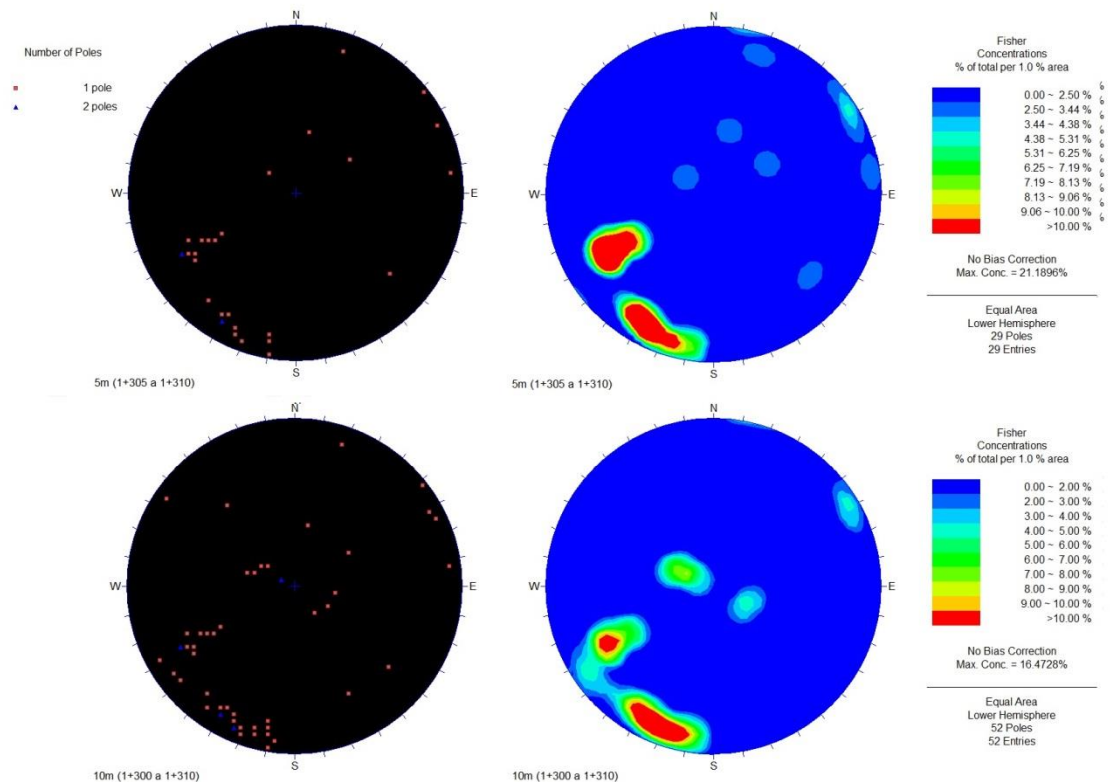


Fig. C40 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+304.50 a 1+308.80 pertencente ao túnel de adução 5, frente B

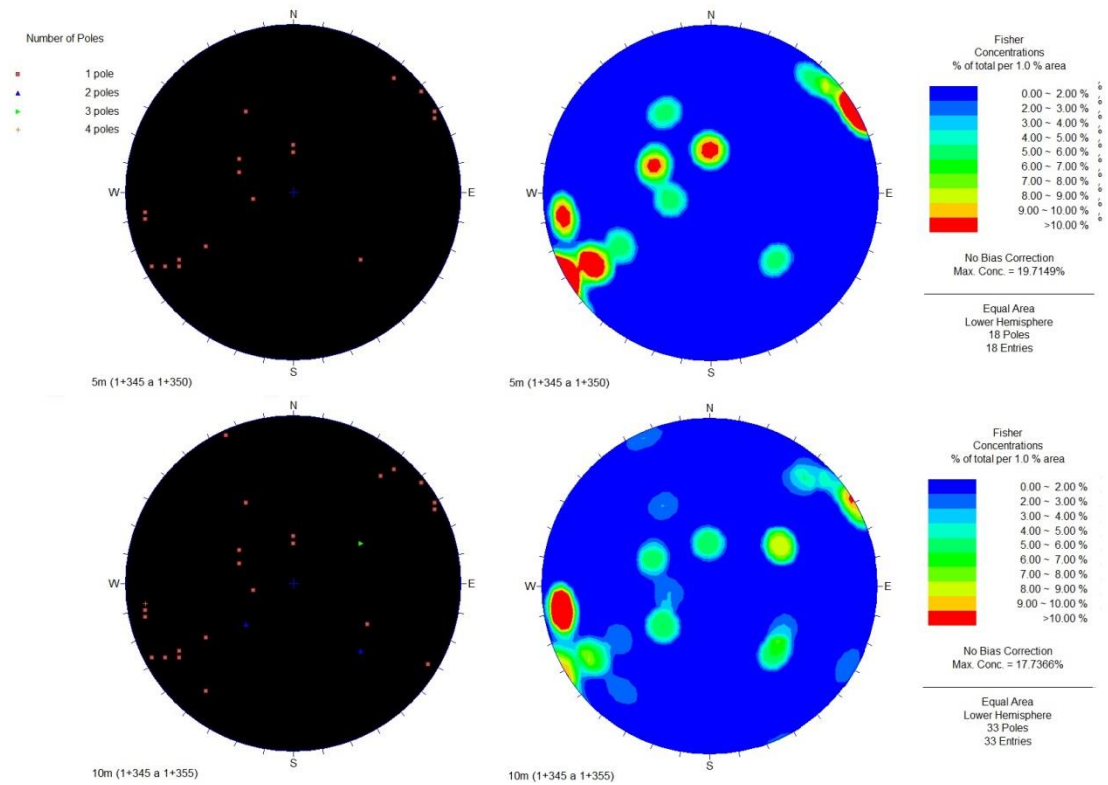


Fig. C41 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+345.20 a 1+349.20 pertencente ao túnel de adução 5, frente B

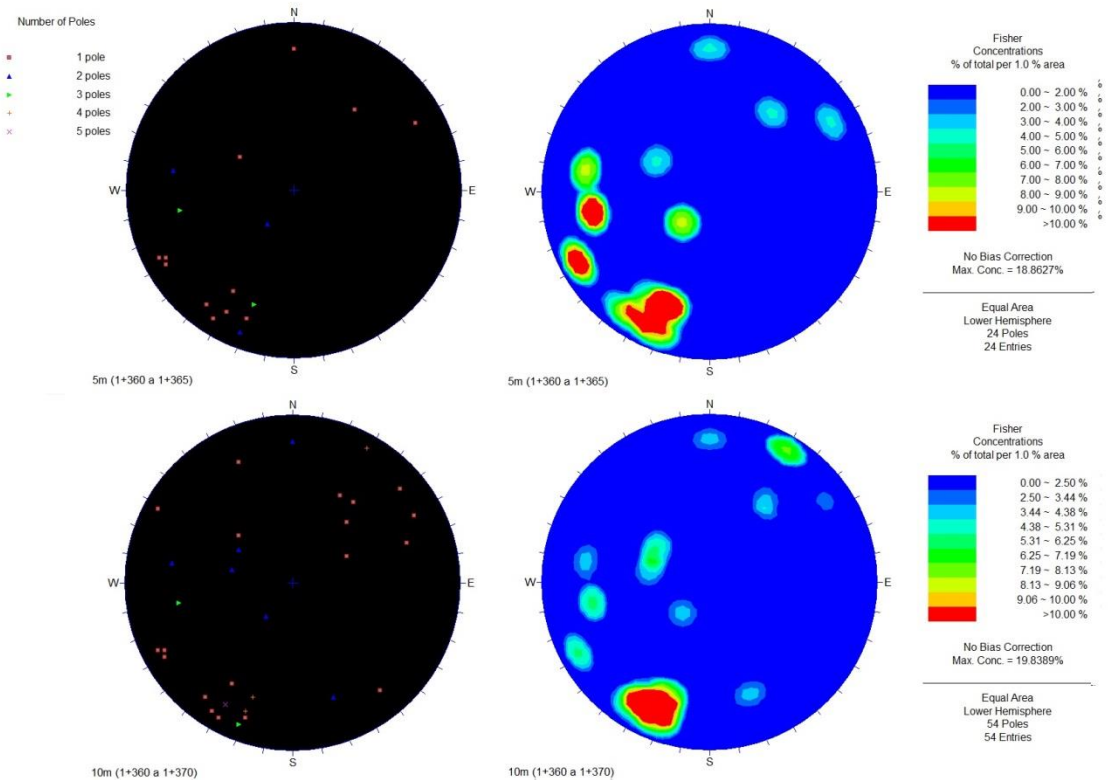


Fig. C42 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+361.70 a 1+365.30 pertencente ao túnel de adução 5, frente B

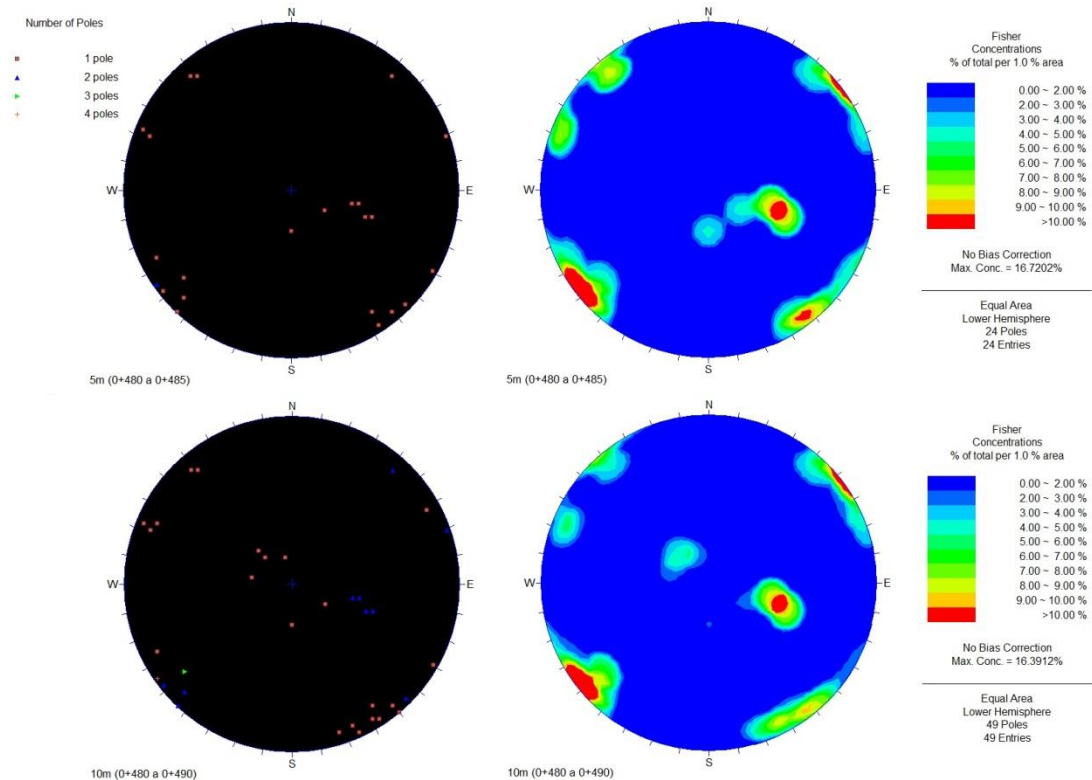


Fig. C43 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+480.00 a 0+486.00 pertencente ao túnel de adução 5, frente C

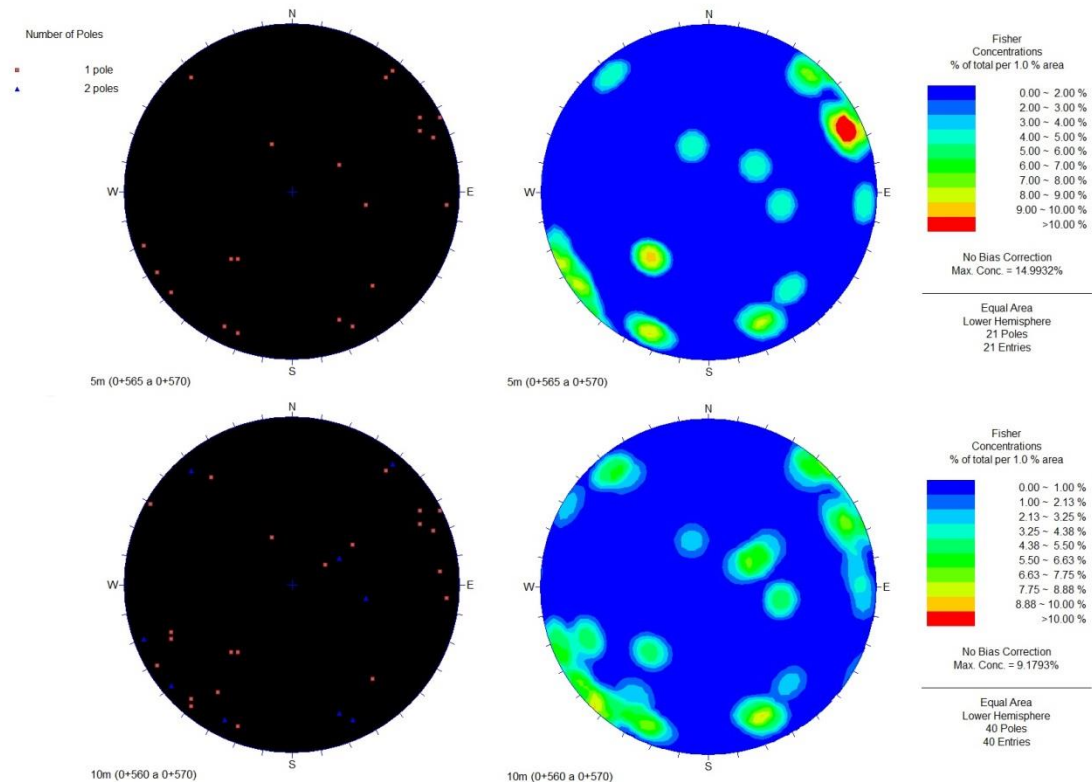


Fig. C44 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+564.00 a 0+569.50 pertencente ao túnel de adução 5, frente C

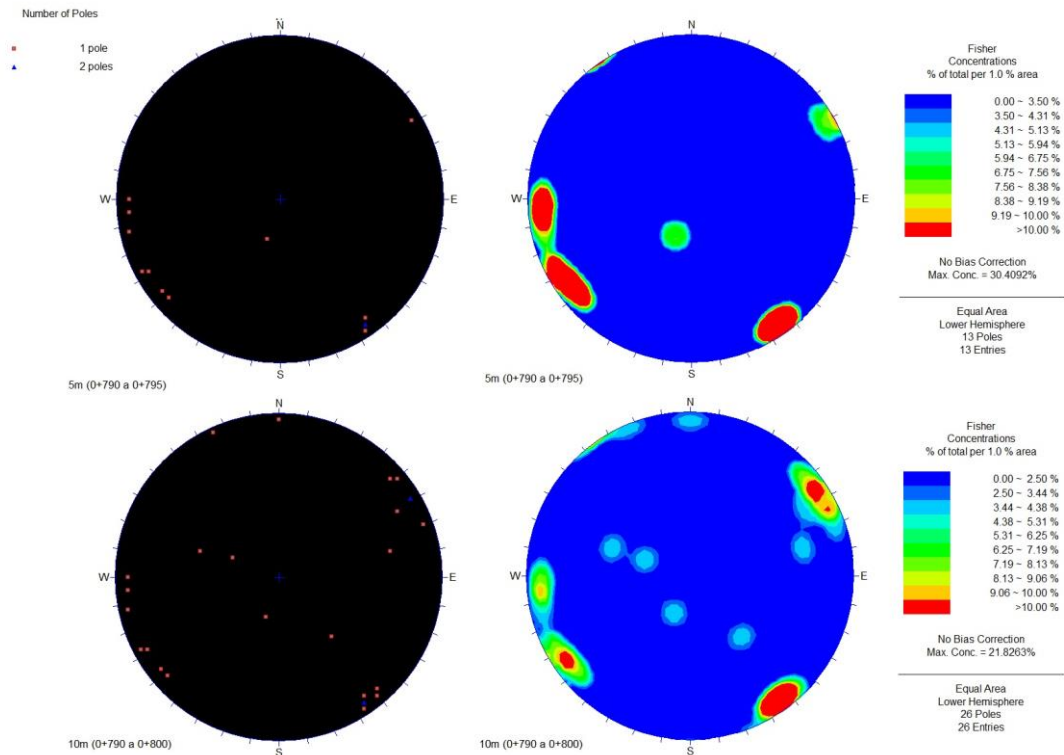


Fig. C45 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+790.00 a 0+796.00 pertencente ao túnel de adução 5, frente C

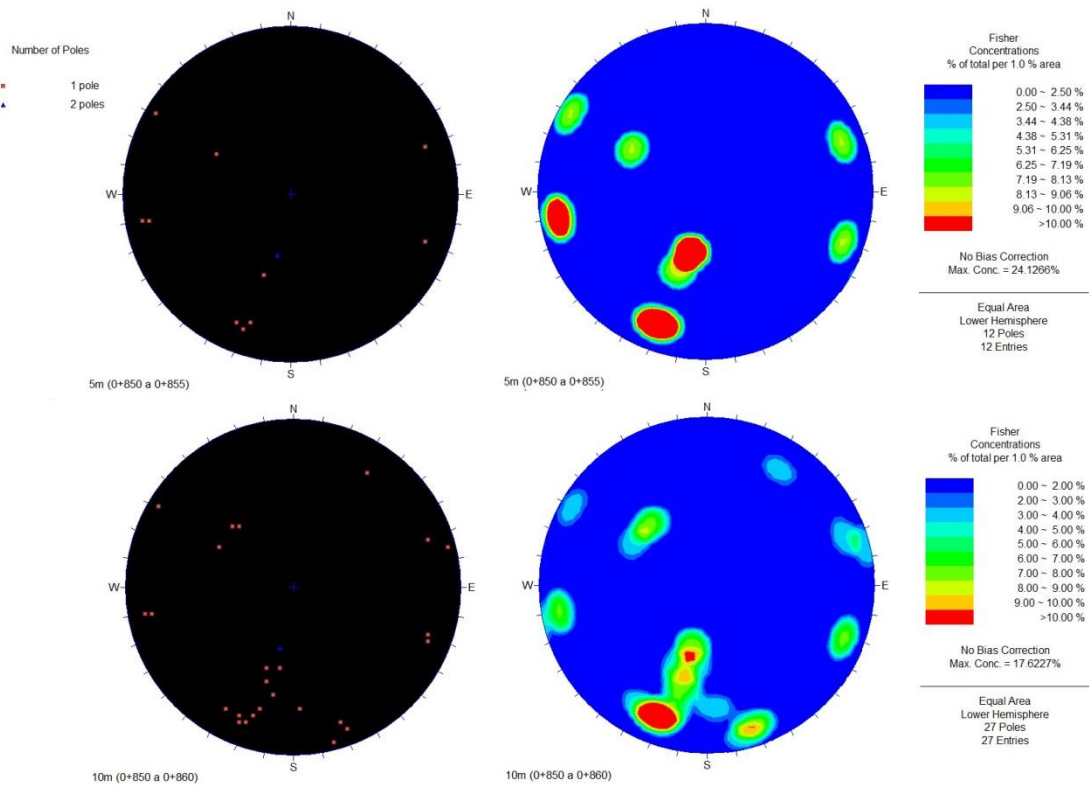


Fig. C46 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+850.00 a 0+855.50 pertencente ao túnel de adução 5, frente C

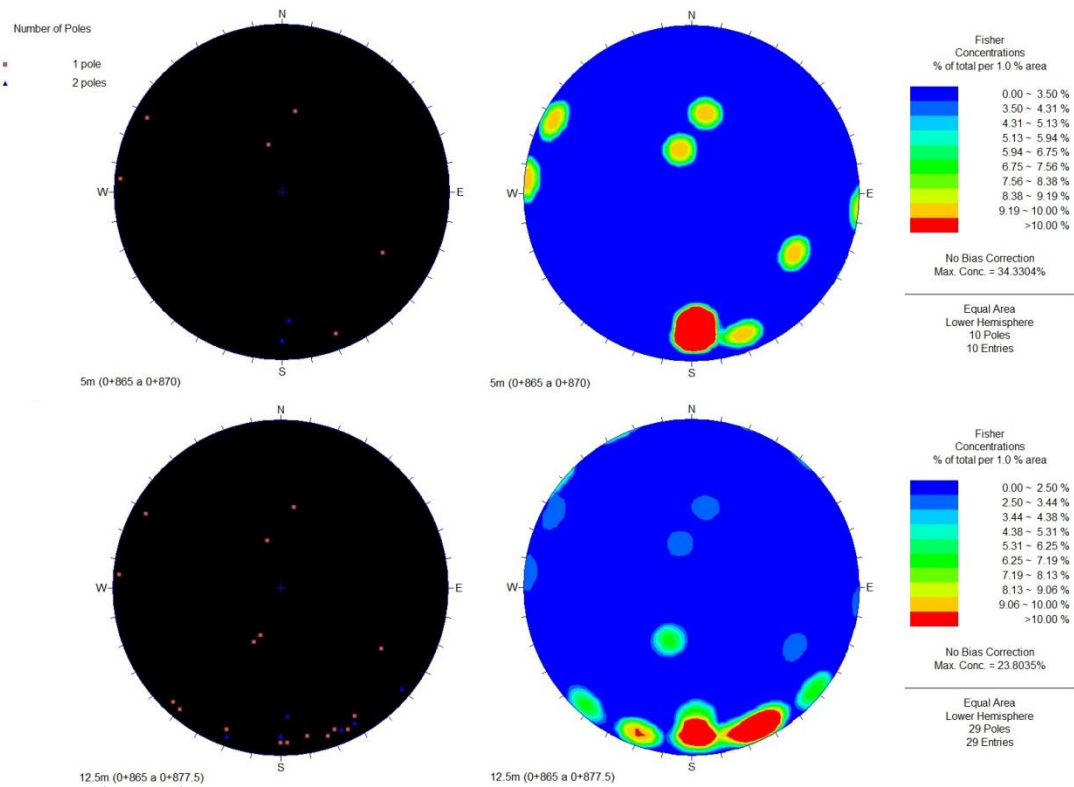


Fig. C47 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+865.50 a 0+872.50 pertencente ao túnel de adução 5, frente C

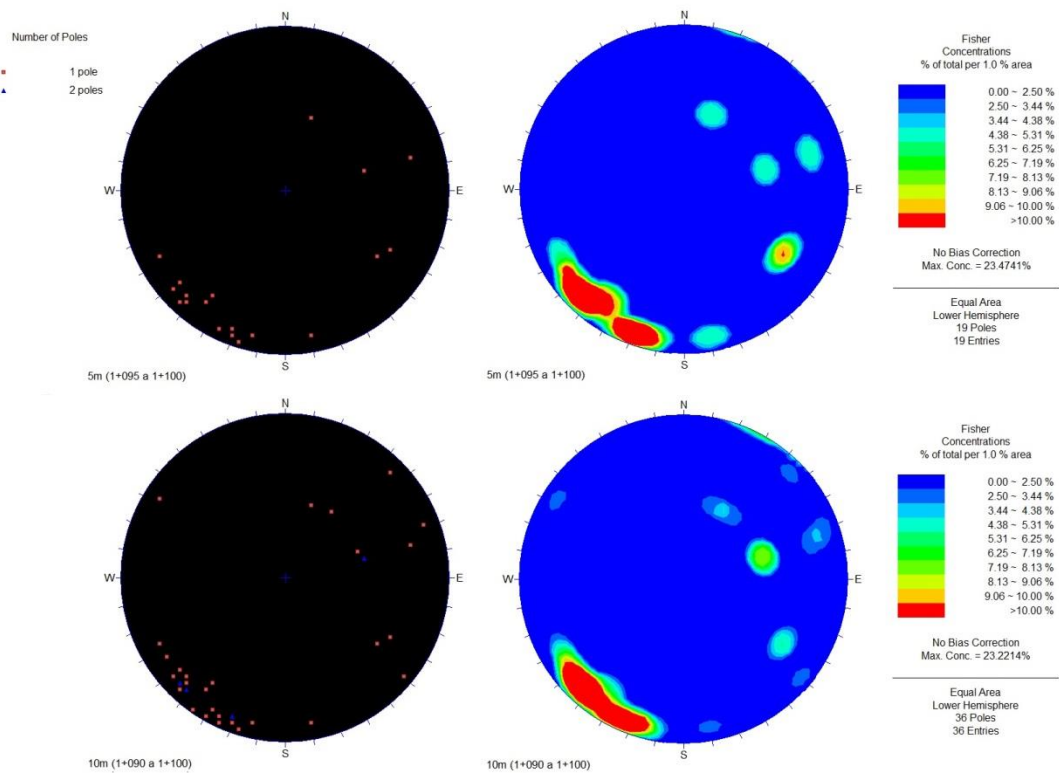


Fig. C48 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 1+094.40 a 1+099.10 pertencente ao túnel de adução 6, frente B

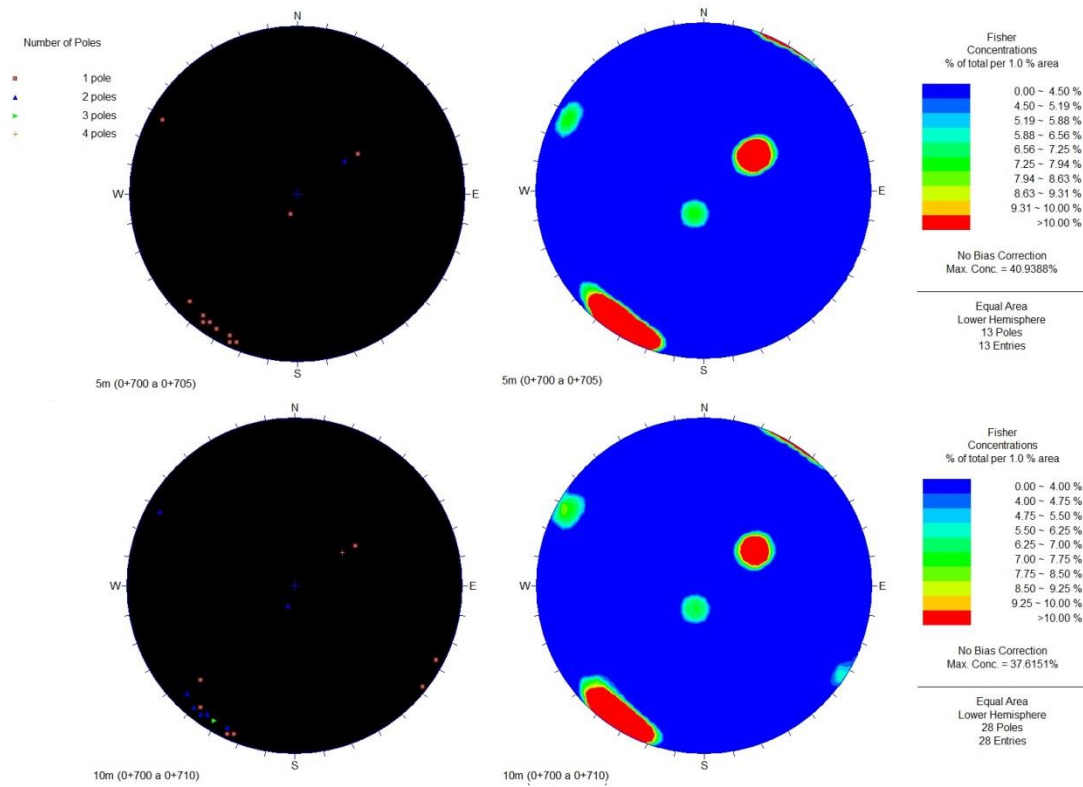


Fig. C49 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+701.50 a 0+707.00 pertencente ao túnel de adução 6, frente C

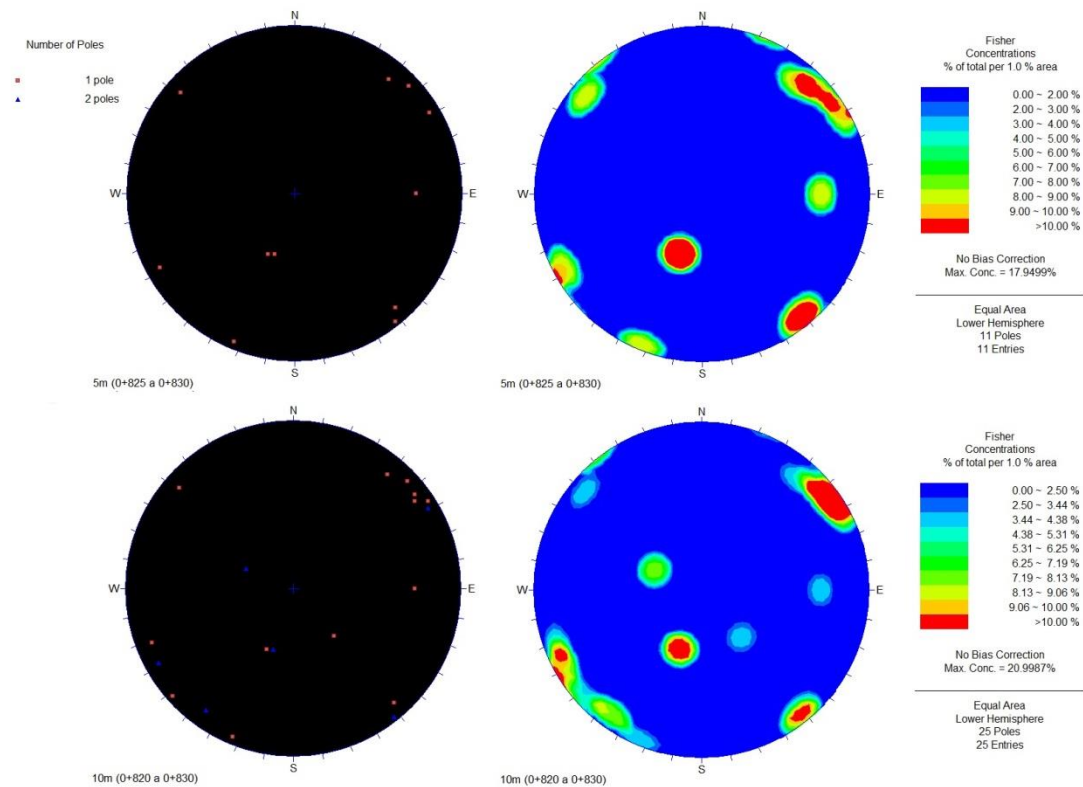


Fig. C50 - Projeção estereográfica das descontinuidades cartografadas no avanço 0+822.50 a 0+829.00 pertencente ao túnel de adução 6, frente C

ANEXO D

DADOS ESTATÍSTICOS

Tabela D1 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+871.70 a 0+875.60 pertencente ao túnel de adução 1, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	0	0,000	0,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	0,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	2	0,028	0,028
	]13,2 - 16,6]	14,9	4	0,056	0,083
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	0,083
Classe 1	]20 - 40]	30	24	0,333	0,417
	]40 - 60]	50	30	0,417	0,833
	]60 - 80]	70	0	0,000	0,833
	]80 - 100]	90	12	0,167	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D2 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+961.90 a 0+966.10 pertencente ao túnel de adução 1, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	0	0,000	0,000
	]6,4-9,8]	8,1	42	0,389	0,389
	]9,8 - 13,2]	11,5	14	0,130	0,519
	]13,2 - 16,6]	14,9	8	0,074	0,593
	]16,6 - 20]	18,3	11	0,102	0,694
Classe 1	]20 - 40]	30	27	0,250	0,944
	]40 - 60]	50	6	0,056	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D3 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+285.50 a 1+288.30 pertencente ao túnel de adução 1, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	0	0,000	0,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	0,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	12	0,167	0,167
	]13,2 - 16,6]	14,9	12	0,167	0,333
	]16,6 - 20]	18,3	6	0,083	0,417
Classe 1	]20 - 40]	30	30	0,417	0,833
	]40 - 60]	50	12	0,167	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D4 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+370.70 a 1+373.80 pertencente ao túnel de adução 1, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	0	0,000	0,000
	]6,4-9,8]	8,1	24	0,222	0,222
	]9,8 - 13,2]	11,5	38	0,352	0,574
	]13,2 - 16,6]	14,9	15	0,139	0,713
	]16,6 - 20]	18,3	4	0,037	0,75
Classe 1	]20 - 40]	30	2	0,019	0,769
	]40 - 60]	50	18	0,167	0,935
	]60 - 80]	70	7	0,065	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D5 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+384.80 a 1+388.50 80 pertencente ao túnel de adução 1, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 1	]20 - 40]	30	48	0,667	0,667
	]40 - 60]	50	6	0,083	0,750
	]60 - 80]	70	16	0,222	0,972
	]80 - 100]	90	2	0,028	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D6 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+825.00 a 0+831.00 pertencente ao túnel de adução 1, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 1	]20 - 40]	30	36	1,000	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D7 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+006.80 a 1+010.90 pertencente ao túnel de adução 2, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	18	0,250	0,250
	]1,38 - 1,92]	1,65	11	0,153	0,403
	]1,92 - 2,46]	2,19	13	0,181	0,583
	]2,46 - 3]	2,73	0	0,000	0,583
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	12	0,167	0,750
	]6,4-9,8]	8,1	12	0,167	0,917
	]9,8 - 13,2]	11,5	3	0,042	0,958
	]13,2 - 16,6]	14,9	3	0,042	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D8 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+329.40 a 1+331.50 pertencente ao túnel de adução 2, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	0	0,000	0,000
	]6,4-9,8]	8,1	32	0,667	0,667
	]9,8 - 13,2]	11,5	16	0,333	1,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D9 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+412.70 a 1+416.60 pertencente ao túnel de adução 2, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	34	0,472	0,472
	]6,4-9,8]	8,1	16	0,222	0,694
	]9,8 - 13,2]	11,5	8	0,111	0,806
	]13,2 - 16,6]	14,9	8	0,111	0,917
	]16,6 - 20]	18,3	2	0,028	0,944
Classe 1	]20 - 40]	30	4	0,056	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D10 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+342.00 a 0+348.00 (A) pertencente ao túnel de adução 2, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 1	]20 - 40]	30	0	0,000	0,250
	]40 - 60]	50	18	0,500	0,500
	]60 - 80]	70	12	0,333	0,833
	]80 - 100]	90	6	0,167	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D11 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+342.00 a 0+348.00 (B) pertencente ao túnel de adução 2, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 1	]20 - 40]	30	12	0,334	0,334
	]40 - 60]	50	24	0,667	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D12 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+501.50 a 0+506.00 pertencente ao túnel de adução 2, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	0	0,000	0,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	0,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	0	0,000	0,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	2	0,056	0,056
	]16,6 - 20]	18,3	5	0,139	0,194
Classe 1	]20 - 40]	30	27	0,750	0,944
	]40 - 60]	50	2	0,056	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D13 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+881.50 a 0+885.50 pertencente ao túnel de adução 2, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	22	0,306	0,306
	]6,4-9,8]	8,1	20	0,278	0,583
	]9,8 - 13,2]	11,5	11	0,153	0,736
	]13,2 - 16,6]	14,9	8	0,111	0,847
	]16,6 - 20]	18,3	11	0,153	1,000
Classe 1	]20 - 40]	30	0	0,000	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D14 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+361.70 a 1+365.90 pertencente ao túnel de adução 3, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 1	]20 - 40]	30	81	0,750	0,750
	]40 - 60]	50	12	0,111	0,861
	]60 - 80]	70	15	0,139	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D15 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+406.10 a 1+410.50 pertencente ao túnel de adução 3, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	0	0,000	0,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	0,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	24	0,222	0,222
	]13,2 - 16,6]	14,9	6	0,056	0,278
	]16,6 - 20]	18,3	42	0,389	0,667
Classe 1	]20 - 40]	30	36	0,333	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D16 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+117.80 a 1+121.10 pertencente ao túnel de adução 3, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	0	0,000	0,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	0,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	0	0,000	0,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	0,000
	]16,6 - 20]	18,3	15	0,417	0,417
Classe 1	]20 - 40]	30	17	0,472	0,889
	]40 - 60]	50	4	0,111	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D17 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+692.00 a 0+698.00 (A) pertencente ao túnel de adução 3, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 1	]20 - 40]	30	36	1,000	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D18 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+692.00 a 0+698.00 (B) pertencente ao túnel de adução 3, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 1	]20 - 40]	30	18	0,500	0,500
	]40 - 60]	50	18	0,500	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D19 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+804.00 a 0+810.00 pertencente ao túnel de adução 3, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	21	0,292	0,292
	]6,4-9,8]	8,1	9	0,125	0,417
	]9,8 - 13,2]	11,5	15	0,208	0,625
	]13,2 - 16,6]	14,9	3	0,042	0,667
	]16,6 - 20]	18,3	2	0,028	0,694
Classe 1	]20 - 40]	30	22	0,306	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D20 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+904.50 a 0+910.50 pertencente ao túnel de adução 3, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	10	0,139	0,139
	]6,4-9,8]	8,1	8	0,111	0,250
	]9,8 - 13,2]	11,5	14	0,194	0,444
	]13,2 - 16,6]	14,9	22	0,306	0,750
	]16,6 - 20]	18,3	6	0,083	0,833
Classe 1	]20 - 40]	30	12	0,167	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D21 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+005.60 a 1+008.90 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	0	0,000	0,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	0,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	8	0,111	0,111
	]13,2 - 16,6]	14,9	10	0,139	0,250
	]16,6 - 20]	18,3	10	0,139	0,389
Classe 1	]20 - 40]	30	44	0,611	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D22 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+030.70 a 1+034.80 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	0	0,000	0,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	0,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	0	0,000	0,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	12	0,167	0,167
	]16,6 - 20]	18,3	18	0,250	0,417
Classe 1	]20 - 40]	30	42	0,583	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D23 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+113.30 a 1+117.40 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	0	0,000	0,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	0,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	9	0,125	0,125
	]13,2 - 16,6]	14,9	9	0,125	0,250
	]16,6 - 20]	18,3	6	0,083	0,333
Classe 1	]20 - 40]	30	36	0,500	0,833
	]40 - 60]	50	6	0,083	0,917
	]60 - 80]	70	6	0,083	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D24 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+201.30 a 1+205.40 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	0	0,000	0,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	0,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	2	0,056	0,056
	]13,2 - 16,6]	14,9	6	0,167	0,222
	]16,6 - 20]	18,3	1	0,028	0,250
Classe 1	]20 - 40]	30	27	0,750	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D25 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+320.20 a 1+323.40 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	6	0,167	0,167
	]1,38 - 1,92]	1,65	1	0,028	0,194
	]1,92 - 2,46]	2,19	2	0,056	0,250
	]2,46 - 3]	2,73	0	0,000	0,250
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	18	0,500	0,750
	]6,4-9,8]	8,1	9	0,250	1,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	0	0,000	1,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D26 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+327.20 a 1+330.40 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	58	0,806	0,806
	]0,84 - 1,38]	1,11	14	0,194	1,000
	]1,38 - 1,92]	1,65	0	0,000	1,000
	]1,92 - 2,46]	2,19	0	0,000	1,000
	]2,46 - 3]	2,73	0	0,000	1,000

Tabela D27 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+399.20 a 1+403.10 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	0	0,000	0,000
	]1,38 - 1,92]	1,65	6	0,056	0,056
	]1,92 - 2,46]	2,19	48	0,444	0,500
	]2,46 - 3]	2,73	0	0,000	0,500
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	54	0,500	1,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	1,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	0	0,000	1,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D28 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+423.40 a 1+427.30 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	4	0,056	0,056
	]1,38 - 1,92]	1,65	14	0,194	0,250
	]1,92 - 2,46]	2,19	16	0,222	0,472
	]2,46 - 3]	2,73	16	0,222	0,694
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	22	0,306	1,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	1,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	0	0,000	1,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D29 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+439.80 a 1+444.50 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	12	0,111	0,111
	]1,38 - 1,92]	1,65	6	0,056	0,167
	]1,92 - 2,46]	2,19	36	0,333	0,500
	]2,46 - 3]	2,73	18	0,167	0,667
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	36	0,333	1,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	1,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	0	0,000	1,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D30 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+587.40 a 1+591.30 pertencente ao túnel de adução 4, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	9	0,083	0,083
	]0,84 - 1,38]	1,11	38	0,352	0,435
	]1,38 - 1,92]	1,65	26	0,241	0,676
	]1,92 - 2,46]	2,19	16	0,148	0,824
	]2,46 - 3]	2,73	11	0,102	0,926
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	8	0,074	1,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	1,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	0	0,000	1,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D31 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+751.50 a 0+757.00 pertencente ao túnel de adução 4, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	7	0,194	0,194
	]1,38 - 1,92]	1,65	2	0,056	0,250
	]1,92 - 2,46]	2,19	9	0,250	0,500
	]2,46 - 3]	2,73	15	0,417	0,917
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	3	0,083	1,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	1,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	0	0,000	1,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D32 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+757.00 a 0+763.50 pertencente ao túnel de adução 4, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	3	0,083	0,083
	]0,84 - 1,38]	1,11	4	0,111	0,194
	]1,38 - 1,92]	1,65	5	0,139	0,333
	]1,92 - 2,46]	2,19	9	0,250	0,583
	]2,46 - 3]	2,73	6	0,167	0,750
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	9	0,250	1,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	1,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	0	0,000	1,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D33 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+770.50 a 0+776.00 pertencente ao túnel de adução 4, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	2	0,056	0,056
	]1,38 - 1,92]	1,65	4	0,111	0,167
	]1,92 - 2,46]	2,19	4	0,111	0,278
	]2,46 - 3]	2,73	6	0,167	0,444
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	20	0,556	1,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	1,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	0	0,000	1,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D34 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+867.00 a 0+872.50 pertencente ao túnel de adução 4, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	0	0,000	0,000
	]1,38 - 1,92]	1,65	0	0,000	0,000
	]1,92 - 2,46]	2,19	0	0,000	0,000
	]2,46 - 3]	2,73	3	0,083	0,083
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	6	0,167	0,250
	]6,4-9,8]	8,1	6	0,167	0,417
	]9,8 - 13,2]	11,5	8	0,222	0,639
	]13,2 - 16,6]	14,9	7	0,194	0,833
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	0,833
Classe 1	]20 - 40]	30	6	0,167	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D35 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+988.00 a 0+994.00 pertencente ao túnel de adução 4, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	3	0,042	0,042
	]6,4-9,8]	8,1	7	0,097	0,139
	]9,8 - 13,2]	11,5	9	0,125	0,264
	]13,2 - 16,6]	14,9	5	0,069	0,333
	]16,6 - 20]	18,3	4	0,056	0,389
Classe 1	]20 - 40]	30	31	0,431	0,819
	]40 - 60]	50	8	0,111	0,931
	]60 - 80]	70	5	0,069	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D36 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+907.60 a 0+912.00 pertencente ao túnel de adução 5, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	0	0,000	0,000
	]6,4-9,8]	8,1	36	0,333	0,333
	]9,8 - 13,2]	11,5	36	0,333	0,667
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	0,667
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	0,667
Classe 1	]20 - 40]	30	36	0,333	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D37 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+927.70 a 0+930.90 pertencente ao túnel de adução 5, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	0	0,000	0,000
	]1,38 - 1,92]	1,65	8	0,111	0,111
	]1,92 - 2,46]	2,19	8	0,111	0,222
	]2,46 - 3]	2,73	6	0,083	0,306
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	34	0,472	0,778
	]6,4-9,8]	8,1	12	0,167	0,944
	]9,8 - 13,2]	11,5	2	0,028	0,972
	]13,2 - 16,6]	14,9	2	0,028	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D38 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+930.90 a 0+934.70 pertencente ao túnel de adução 5, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	0	0,000	0,000
	]1,38 - 1,92]	1,65	0	0,000	0,000
	]1,92 - 2,46]	2,19	0	0,000	0,000
	]2,46 - 3]	2,73	4	0,056	0,056
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	26	0,361	0,417
	]6,4-9,8]	8,1	18	0,250	0,667
	]9,8 - 13,2]	11,5	8	0,111	0,778
	]13,2 - 16,6]	14,9	4	0,056	0,833
	]16,6 - 20]	18,3	4	0,056	0,889
Classe 1	]20 - 40]	30	8	0,111	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D39 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+142.80 a 1+147.10 pertencente ao túnel de adução 5, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 1	]20 - 40]	30	27	0,750	0,750
	]40 - 60]	50	9	0,250	0,250
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D40 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+304.50 a 1+308.80 pertencente ao túnel de adução 5, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	6	0,056	0,056
	]0,84 - 1,38]	1,11	12	0,111	0,167
	]1,38 - 1,92]	1,65	16	0,148	0,315
	]1,92 - 2,46]	2,19	5	0,046	0,361
	]2,46 - 3]	2,73	6	0,056	0,417
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	27	0,250	0,667
	]6,4-9,8]	8,1	30	0,278	0,944
	]9,8 - 13,2]	11,5	6	0,056	1,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D41 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+345.20 a 1+349.20 pertencente ao túnel de adução 5, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	0	0,000	0,000
	]1,38 - 1,92]	1,65	2	0,019	0,019
	]1,92 - 2,46]	2,19	4	0,037	0,056
	]2,46 - 3]	2,73	18	0,167	0,222
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	60	0,556	0,778
	]6,4-9,8]	8,1	24	0,222	1,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	0	0,000	1,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D42 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+361.70 a 1+365.30 pertencente ao túnel de adução 5, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	0	0,000	0,000
	]1,38 - 1,92]	1,65	0	0,000	0,000
	]1,92 - 2,46]	2,19	0	0,000	0,000
	]2,46 - 3]	2,73	6	0,083	0,083
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	34	0,472	0,556
	]6,4-9,8]	8,1	10	0,139	0,694
	]9,8 - 13,2]	11,5	10	0,139	0,833
	]13,2 - 16,6]	14,9	6	0,083	0,917
	]16,6 - 20]	18,3	2	0,028	0,944
Classe 1	]20 - 40]	30	4	0,056	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D43 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+480.00 a 0+486.00 pertencente ao túnel de adução 5, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	0	0,000	0,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	0,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	12	0,167	0,167
	]13,2 - 16,6]	14,9	24	0,333	0,500
	]16,6 - 20]	18,3	24	0,333	0,833
Classe 1	]20 - 40]	30	12	0,167	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D44 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+564.00 a 0+569.50 pertencente ao túnel de adução 5, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	0	0,000	0,000
	]1,38 - 1,92]	1,65	0	0,000	0,000
	]1,92 - 2,46]	2,19	0	0,000	0,000
	]2,46 - 3]	2,73	6	0,083	0,083
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	37	0,514	0,597
	]6,4-9,8]	8,1	11	0,153	0,750
	]9,8 - 13,2]	11,5	7	0,097	0,847
	]13,2 - 16,6]	14,9	10	0,139	0,986
	]16,6 - 20]	18,3	1	0,014	1,000

Tabela D45 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+790.00 a 0+796.00 pertencente ao túnel de adução 5, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	0	0,000	0,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	0,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	12	0,333	0,333
	]13,2 - 16,6]	14,9	6	0,167	0,500
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	0,500
Classe 1	]20 - 40]	30	12	0,333	0,833
	]40 - 60]	50	6	0,167	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D46 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+850.00 a 0+855.50 pertencente ao túnel de adução 5, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	0	0,000	0,000
	]1,38 - 1,92]	1,65	0	0,000	0,000
	]1,92 - 2,46]	2,19	4	0,0556	0,056
	]2,46 - 3]	2,73	16	0,222	0,278
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	52	0,722	1,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	1,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	0	0,000	1,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D47 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+866.50 a 0+872.50 pertencente ao túnel de adução 5, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	0	0,000	0,000
	]1,38 - 1,92]	1,65	0	0,000	0,000
	]1,92 - 2,46]	2,19	8	0,111	0,111
	]2,46 - 3]	2,73	16	0,222	0,333
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	42	0,583	0,917
	]6,4-9,8]	8,1	6	0,083	1,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	0	0,000	1,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D48 - Tabela de frequências obtida para o avanço 1+094.40 a 1+099.10 pertencente ao túnel de adução 6, frente B

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	0	0,000	0,000
	]1,38 - 1,92]	1,65	0	0,000	0,000
	]1,92 - 2,46]	2,19	0	0,000	0,000
	]2,46 - 3]	2,73	8	0,222	0,222
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	28	0,778	1,000
	]6,4-9,8]	8,1	0	0,000	1,000
	]9,8 - 13,2]	11,5	0	0,000	1,000
	]13,2 - 16,6]	14,9	0	0,000	1,000
	]16,6 - 20]	18,3	0	0,000	1,000

Tabela D49 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+701.50 a 0+707.00 pertencente ao túnel de adução 6, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 1	]20 - 40]	30	0	0,000	0,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	0,000
	]60 - 80]	70	36	1,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000

Tabela D50 - Tabela de frequências obtida para o avanço 0+822.50 a 0+829.00 pertencente ao túnel de adução 6, frente C

Q Barton (combinação de parâmetros)					
Classe	Intervalo	Ponto Médio	Freq. Absoluta	Freq. Relativa	Freq. Relativa acumulada
Classe 3	]0,3 - 0,84]	0,57	0	0,000	0,000
	]0,84 - 1,38]	1,11	0	0,000	0,000
	]1,38 - 1,92]	1,65	0	0,000	0,000
	]1,92 - 2,46]	2,19	3	0,042	0,042
	]2,46 - 3]	2,73	2	0,028	0,069
Classe 2	]3 - 6,4]	4,7	20	0,278	0,347
	]6,4-9,8]	8,1	14	0,194	0,542
	]9,8 - 13,2]	11,5	13	0,181	0,722
	]13,2 - 16,6]	14,9	8	0,111	0,833
	]16,6 - 20]	18,3	8	0,111	0,944
Classe 1	]20 - 40]	30	4	0,056	1,000
	]40 - 60]	50	0	0,000	1,000
	]60 - 80]	70	0	0,000	1,000
	]80 - 100]	90	0	0,000	1,000
	]100 - 120]	110	0	0,000	1,000
	]120 - +inf[	260	0	0,000	1,000